УДК 622.271

Ю.Г. Вилкул, В.К. Слободянюк, И.И. Максимов

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМОВ ГОРНО-КАПИТАЛЬНЫХ РАБОТ ПРИ ВСКРЫТИИ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ ТРАССАМИ СПИРАЛЬНОЙ ФОРМЫ

Получено уравнение трассы спиральной формы. Установлена уточненная формула для определения объема горно-капитальных работ, необходимых для сооружения трасс спиральной формы в глубоких карьерах. Выполнен анализ полученной формулы и установлен характер зависимости объемов работ по сооружению системы вскрывающих выработок от главных параметров карьера. Для трасс спиральной формы установлен коэффициент приращения объемов горных работ, проанализирован характер его изменения в зависимости от глубины карьера.

Одним из важных вопросов, решаемых в ходе проектирования открытой разработки, является выбор рациональной конструкции трассы вскрывающих выработок. Размещение на борту карьера системы вскрывающих выработок приводит к уменьшению углов откосов бортов карьера, что вызывает дополнительное вовлечение в границы карьера до 30% вскрышных пород от объема их первоначального оконтуривания и приводит к уменьшению проектной глубины карьера. Конструктивные особенности размещения на борту карьера транспортных коммуникаций и перегрузочных пунктов комбинированного транспорта являются ключевым фактором, влияющим на экономически обоснованные границы карьера.

В теории и практике горного дела вопросам проектирования трасс спиральной формы уделено значительное внимание. Однако исследователи [1-3] отмечают приближенный характер своих теоретических исследований и полученных результатов, что обуславливает необходимость дальнейшего развития и уточнения теории вскрытия карьерных полей. В работе [3] отмечено увеличение объема горных работ по периферии карьера в районе расположения пустых пород, однако не приводится качественная и количественная оценка объемов работ по разносу бортов карьера при проведении трасс спиральной формы.

В теории вскрытия карьерных полей не нашла должного отражения проблема определения и минимизации дополнительных объемов вскры-шных работ, вызванных необходимостью разноса верхних горизонтов глубоких карьеров в ходе реконструкции схемы вскрытия [4].

Целью данной работы является определение дополнительных объемов горных работ при проведении трасс спиральной формы в глубоких карьерах для случая, когда начало горных работ в зоне очередного витка трассы требует переноса трассы на вышележащих горизонтах (разнос бортов карьера).

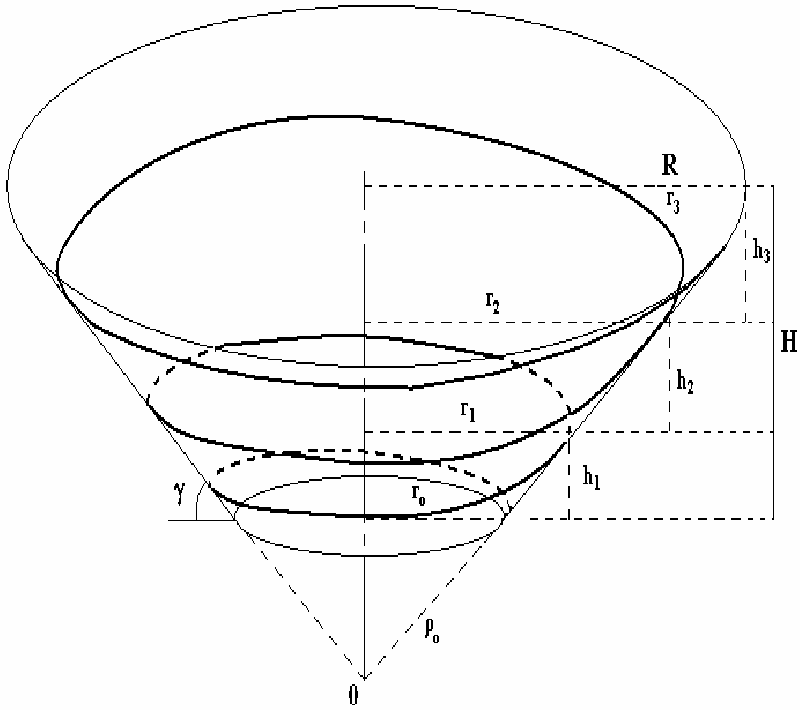

Рис. 1. Коническая модель карьера

Для достижения вышеназванной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- вывод уравнения спиральной трассы;
- исследование основных свойств спиральной трассы и ее горизонтальной проекции;
- определение объема горных работ по проведению трассы спиральной формы;
- относительная оценка увеличения объемов горно-капитальных работ при проведении спиральной трассы в глубоких карьерах.

Для вывода формулы спиральной трассы рассмотрим модель карьера в виде усеченного конуса (рис. 1), где r_0 – радиус дна карьера, м; R – радиус карьера по верхнему контуру, м; γ – средний угол откоса борта карьера.

Уравнение линии трассы ищем в полярной системе координат с центром в точке О – вершине конуса.

ρ(φ) – уравнение линии трассы – расстояние от полюса до точек трассы.

$r(\varphi) = \rho(\varphi)\cos\gamma$ - горизонтальная проекция линии трассы.

При движении технологического транспорта по конической поверхности борта карьера в каждой точке угол между линией трассы и ее проекцией на горизонтальную плоскость остается постоянным и определяется уклоном i = tgβ, что позволяет составить дифференциальное уравнение, решив которое, определим уравнение линии трассы.

Рассмотрим рис. 2, на котором изображен фрагмент спиральной трассы.

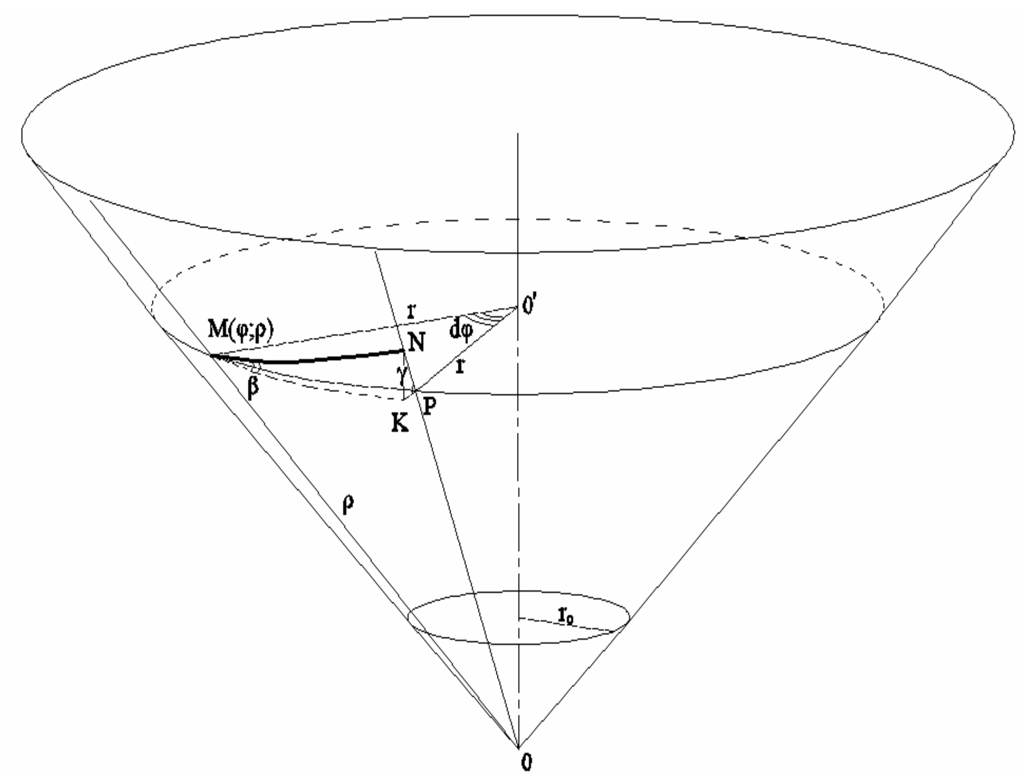

Рис. 2. Фрагмент линии трассы спиральной формы

Пусть точка M(φ; ρ) – произвольная точка линии трассы. При увеличении угла поворота на величину dφ точка M перемещается по конической поверхности в точку N. MN – участок линии трассы; MK – проекция линии трассы на горизонтальную плоскость. При увеличении угла на величину dφ расстояние от точки линии трассы до оси конуса увеличивается на величину:

$$KP = dr = r' \cdot d\varphi$$

Тогда $NK = KP \cdot tg\gamma = r' \cdot tg\gamma \cdot d\varphi$

$$MK = \sqrt{MP^2 + KP^2} =$$

$$= \sqrt{r^2 d\varphi^2 + (r')^2 d\varphi^2} = \sqrt{r^2 + (r')^2} \cdot d\varphi$$

Находим тангенс угла β.

$$tg\beta = \frac{NK}{MK} = \frac{r' \cdot tg\gamma \cdot d\varphi}{\sqrt{r^2 + (r')^2 \cdot d\varphi}}$$

Получаем дифференциальное уравнение относительно функции $r = r(\varphi)$:

$$r' \cdot tg\gamma = tg\beta \cdot \sqrt{r^2 + (r')^2} \qquad (1)$$

Разделяем переменные:

$$\frac{r'}{r} = m, \qquad (2)$$

где $m = \dfrac{tg\beta}{\sqrt{tg^2\gamma - tg^2\beta}}$.

Общее решение уравнения:

$$r = c \cdot e^{m\varphi} \qquad (3)$$

Константу интегрирования определяем из начального условия (при φ = 0; r = r_0 – начальный радиус, в рассматриваемой задаче r_0 – радиус дна карьера). Уравнение расстояния точек линии трассы от оси конуса (горизонтальная проекция спиральной трассы):

$$r = r_0 \cdot e^{m\varphi} \qquad (4)$$

С учетом взаимосвязи горизонтальной проекции линии трассы с функцией расстояния от полюса $r(\varphi) = \rho(\varphi)\cos\gamma$, получаем уравнение спиральной трассы – расстояние от точек линии трассы до вершины конуса (точка О, рис. 1):

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{m\varphi} = \frac{r_0}{\cos\gamma} \cdot e^{m\varphi} \qquad (5)$$

Полученные уравнения показывают, что линия трассы является конической винтовой линией, а ее проекция на горизонтальную плоскость – логарифмической спиралью.

В общем виде формула (5) принимает вид:

$$\rho = \frac{r_0}{\cos\varphi} \cdot e^{\frac{tg\beta}{\sqrt{tg^2\gamma - tg^2\beta}}} \qquad (6)$$

Рассмотрим основные горно-геометрические свойства спиральной трассы на конической поверхности.

Сначала находим радиусы витков (i – номер витка):

$$r_i = r_0 \cdot e^{2\pi m i} \qquad (7)$$

$$r_1 = r_0 \cdot e^{2\pi m}$$

$$r_2 = r_0 \cdot e^{4\pi m}$$

$$r_3 = r_0 \cdot e^{6\pi m}$$

. . . .

$$r_n = r_0 \cdot e^{2n\pi m}$$

Обозначим $q = e^{2\pi m}$

Радиусы витков образуют геометрическую прогрессию со знаменателем q.

При $tg\beta = 0{,}1$; $\gamma = 45^o$; $q = 1{,}88$
При $tg\beta = 0{,}1$; $\gamma = 40^o$; $q = 2{,}13$
При $tg\beta = 0{,}1$; $\gamma = 35^o$; $q = 2{,}48$
При $tg\beta = 0{,}1$; $\gamma = 30^o$; $q = 3{,}02$

Так как радиус верхнего контура карьера совпадает с радиусом n-го витка, определяем количество витков спирального съезда. ($R = r_n$)

$$R = r_0 + \frac{H}{tg\gamma} = r_0 \cdot e^{2n\pi m} \qquad (8)$$

Из формулы (8) находим количество витков спирального съезда:

$$n = \frac{\sqrt{tg^2\gamma - tg^2\beta}}{2\pi \cdot tg} \cdot \ln\left(1 + \frac{H}{r_0 \cdot tg\gamma}\right).$$

(9)

При $\gamma >> \beta$ получаем более простую приближенную формулу

$$n \approx \frac{tg\gamma}{2\pi \cdot tg\beta} \cdot \ln\left(1 + \frac{H}{r_0 \cdot tg\gamma}\right) \qquad (10)$$

Аналогичными рассуждениями можно показать, что высоты и длины отдельных витков так же образуют геометрическую прогрессию с тем же знаменателем q, что подтверждается при построении планов и профилей трасс спиральной формы глубоких карьеров.

Определим объем горной породы, подлежащий выемке в ходе размещения трассы спиральной формы, имеющей n витков. Найдем объем срезанной части горной породы, соответствующий центральному углу $d\varphi$ (рис. 3).

Необходимо найти объем тела MNPK,ABCD ограниченного поверхностями конусов с радиусами $r_1 = r_0 \cdot e^{m\varphi}$ и $r_2 = B + r_0 e^{m\varphi}$ (B – ширина съезда), горизонтальной площадкой ABCD и наклонной площадкой MNPK. Наклонная площадка MNPK представляет собой элемент съезда, соответствующий центральному углу $d\varphi$.

При малых $d\varphi$ функция $r(\varphi)$ изменяется незначительно и можно принять, что высота равна $h_i = (R - r(\varphi_i))tg\gamma$.

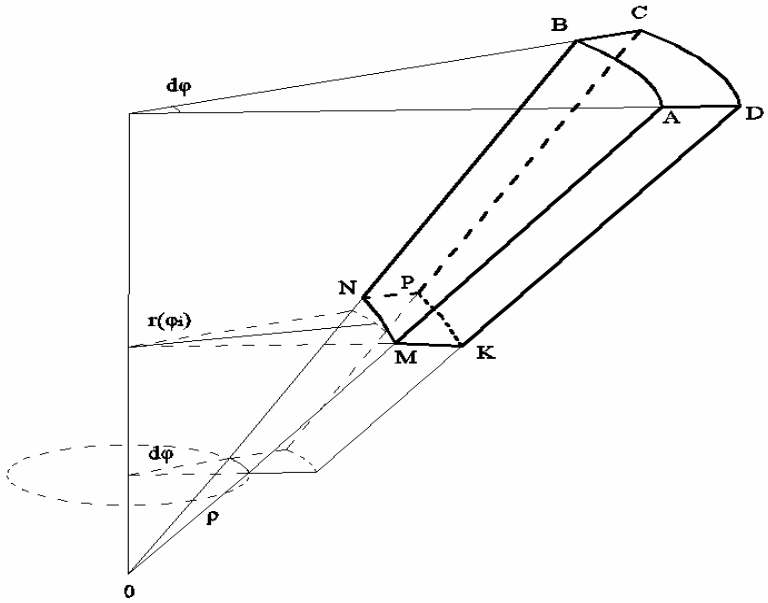

Рис. 3. Схема к расчету объема горных работ при проведении спиральной трассы

Объем i-ой части равен:

$$V_i = \frac{S_B + S_H}{2} \cdot h_i$$

где h_i - высота для i-ой части тела; S_B - площадь верхней площадки i-й части тела; S_H - площадь нижней площадки i-ой части тела.

$$S_B = \frac{d\varphi}{2}\left[(R+B)^2 - R^2\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left(2RH + B^2\right)d\varphi = \left(RB + \frac{B^2}{2}\right)d\varphi$$

$$S_H = \frac{d\varphi}{2}\left[(r(\varphi_i)+B)^2 - r^2(\varphi_i)\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\left(2r(\varphi_i)\cdot B + B^2\right)d\varphi = \left(r(\varphi_i)B + \frac{B^2}{2}\right)d\varphi$$

Окончательно получаем:

$$V_i = \left[R - r(\varphi_i)\right]\cdot tg\gamma \cdot \frac{1}{2}\left[RB + r(\varphi_i)B + B^2\right]d\varphi$$

Объем всего тела равен пределу интегральной суммы:

$$V = \lim_{d\varphi\to 0}\frac{tg\gamma}{2}\sum\left[R - r(\varphi)\right]tg\gamma \times$$

$$\times \frac{1}{2}\left[RB + r(\varphi_i)B + B^2\right]d\varphi$$

Поэтому объем горной массы можно найти при помощи определенного интеграла:

$$V = \frac{tg\gamma}{2}\int_0^{2\pi n}\left(R - r_0 e^{m\varphi}\right)\times$$

$$\times\left(RB + B^2 + B\cdot r_0 e^{m\varphi}\right)d\varphi =$$

$$= \frac{tg\gamma}{2}\cdot\left[R\cdot B(R+B)\cdot\left(\varphi\Big|_0^{2\pi n}\right) - \right.$$

$$\left. - \frac{r_0 B^2}{m}\left(e^{m\varphi}\Big|_0^{2\pi n}\right) - \frac{Br_0^2}{2m}\left(e^{2m\varphi}\Big|_0^{2\pi n}\right)\right] =$$

$$= \frac{Btg\gamma}{2}\left[2\pi nR(R+B) - \frac{r_0 B}{m}\left(e^{2\pi nm} - 1\right) - \right.$$

$$\left. - \frac{r_0^2}{2m}\cdot\left(e^{4\pi nm} - 1\right)\right] =$$

$$= \pi BR(R+B)tg\gamma\cdot n - \frac{\sqrt{tg^2\gamma - tg^2\beta}}{tg\beta}\times$$

$$\times\left[\frac{1}{2}B^2H+\frac{1}{4}B\cdot r_0\cdot(q^n+1)\right]$$

Используя формулу $H=r_0 tg\gamma(q^n-1)$, находим:

$$q^n+1=\frac{H}{r_0 tg\gamma}+2$$

$$V=\pi\cdot B\cdot R(R+B)\cdot tg\gamma\cdot n-$$

$$-\frac{B}{2}\cdot\frac{\sqrt{tg^2\gamma-tg^2\beta}}{tg\beta}\cdot\left[BH+r_0+\frac{H}{2tg\gamma}\right]$$

Используя формулу определения количества витков спирали (9) и вынося общие сомножители, получаем:

$$V=\frac{B}{2}\frac{\sqrt{tg^2\gamma-tg^2\beta}}{tg\beta}\times$$

$$\times\left(R(R+B)tg\gamma\ln\frac{R}{r_0}-BH-r_0-\frac{H}{2tg\gamma}\right) \qquad (12)$$

Используя формулу определения радиуса верхнего контура карьера (8), окончательно находим:

$$V=\frac{B}{2tg\beta}\frac{\sqrt{tg^2\gamma-tg^2\beta}}{tg\gamma}\times$$

$$\times\left\{\left[(H+r_0 tg\gamma)^2+(H+r_0 tg\gamma)Btg\gamma\right]\times\right. \qquad (13)$$

$$\left.\times\ln(1+\frac{H}{r_0 tg\gamma})-\frac{H^2}{2}-Htg\gamma(r_0+B)\right\}$$

Величина объема горно-капитальных работ при сооружении трассы спиральной формы прямо пропорциональна ширине траншеи, обратно пропорциональна уклону траншеи и возрастает с увеличением глубины H и размеров дна r_0 карьера.

Полученная формула аналогична общепринятой формуле для определения объема горных работ для строительства системы капитальных траншей (без учета влияния на длину трассы горизонтальных площадок и площадок со смягченным уклоном) [1]:

$$V=\frac{BH^2}{2tg\beta} \qquad (14)$$

При существующих углах откоса бортов карьера (25º-45º) величина сомножителя $\frac{\sqrt{tg^2\gamma-tg^2\beta}}{tg\gamma}$ приближается к 1 и его можно не учитывать.

Преобразуем формулу (13) к виду [4]:

$$V=\frac{BH^2}{2tg\beta}\times K_т, \qquad (16)$$

где $K_т$ – коэффициент, учитывающий дополнительное увеличение объема горных работ, обусловленное необходимостью разноса бортов карьера для размещения системы спиральных съездов при вскрытии новых горизонтов (рассматривается случай, когда формирование нового витка спирального съезда приводит к необходимости разноса бортов предыдущих этапов).

$$K_т=\frac{\left[(H+r_0 tg\gamma)^2+(H+r_0 tg\gamma)Btg\gamma\right]}{H^2}\times$$

$$\times\frac{\ln(1+\frac{H}{r_0 tg\gamma})-\frac{H^2}{2}-Htg\gamma(r_0+B)}{H^2} \qquad (17)$$

Величина коэффициента $K_т$ зависит от главных параметров карьера. Исследуем его изменение при увеличении глубины карьера.

На рис. 4 приведены графики изменения коэффициента $K_т$ с увеличением глубины карьера при различных размерах его дна (r_0 = 50−25 0м), ширине дороги 30 м, угле откоса борта карьера 40º. Полученные зависимости хорошо аппроксимируются линейными функциями

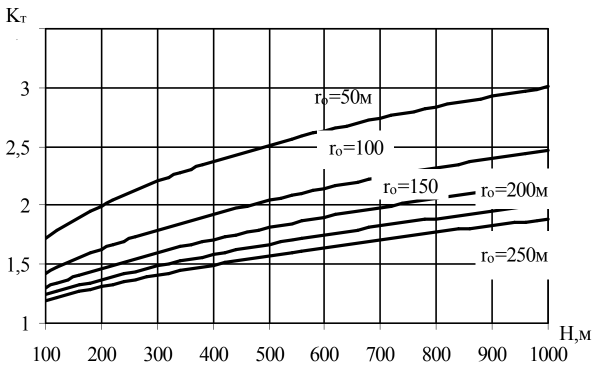

Рис. 4. Графики изменения коэффициента $K_т$ с увеличением глубины карьера при различных размерах его дна

− величина коэффициента $К_т$ пропорциональна глубине карьера. С уменьшением размеров дна карьера, при равной глубине, увеличивается количество витков спирального съезда, степень разноса бортов карьера и значение коэффициента $К_т$. При глубинах карьера 300−500 м и радиусах дна 100−200 м реальный объем горных работ по проведению трассы спиральной формы в ходе реконструкции карьера в 1,5−2,1 раза превышает объем работ, рассчитанный по общепринятым формулам [1-3], что необходимо учитывать при проектировании схемы транспортных коммуникаций карьера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ржевский В.В.* Открытые горные работы. – М.: Недра, 1985. – 509 с.
2. Анистратов Ю.И. Технология открытых горных работ. – М.: Недра, 1995. – 216 с.
3. *Арсентьев А.И.* Вскрытие и системы разработки карьерных полей. – М.: Недра, 1981. – 278 с.
4. *Слободянюк В.К., Максимов И.И.* Аналитические исследования влияния схемы вскрытия на главные параметры карьера // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг: КТУ. – Вип. 14. – 2006. – С. 11-14. ГИАБ

Коротко об авторах

Вилкул Юрий Григорьевич – профессор, доктор технических наук, ректор, заведующий кафедрой «Открытые горные работы» Криворожского технического университета,
Слободянюк Валерий Константинович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Открытые горные работы» Криворожского технического университета,
Максимов Иван Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры математики Криворожского технического университета.