

А.М. Маевский, Н.В. Несвитаило, Б.Е. Собко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦЫ ПЕРЕХОДА С ОТКРЫТЫХ РАБОТ НА ПОДЗЕМНЫЕ ДЛЯ УСЛОВИЙ РАЗРАБОТКИ ШТОКООБРАЗНЫХ КРУТОПАДАЮЩИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Выполнен анализ научно-исследовательских работ по теории и методологии установления граничных параметров комбинированной последовательной открыто-подземной разработки крутопадающих месторождений, который показал, что ряд аспектов этой проблемы в ее методологическом и прикладном значениях остаются недостаточно определенными и требуют дальнейшего научного обоснования и поиска эффективных практических решений, поскольку большинство результатов исследованных базируются на определении конечной глубины карьера.

ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ ПЕРЕХОДУ З ВІДКРИТИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ НА ПІДЗЕМНІ ДЛЯ УМОВ РОЗРОБКИ ШТОКОПОДІБНИХ КРУТОСПАДНИХ РОДОВИЩ

Виконано аналіз науково-дослідних робіт з теорії та методології встановлення граничних параметрів комбінованої послідовної відкрито-підземної розробки крутоспадних родовищ, який показав, що низка аспектів цієї проблеми в її методологічному і прикладному значеннях залишаються недостатньо визначеними та потребують подальшого наукового обґрунтування і пошуку ефективних практичних рішень, оскільки більшість результатів досліджень базуються на визначенні кінцевої глибини кар'єру.

DETERMINATION OF TRANSITION BORDER FROM OPEN MINING WORKS TO UNDERGROUND FOR TERMS DEVELOPMENTS OF ROD-SHAPED STEEPLY-DIPPING DEPOSITS

The analysis of research works is executed on a theory and methodology of establishment of border parameters to the combined successive openly-underground development of high-dipping deposits, that showed that row of aspects of this problem in her methodological and applied values remain certain not enough and require a further scientific ground and search of effective practical decisions, as most results of researches are based on determination of eventual depth of quarry.

ВВЕДЕНИЕ

На глубокозалегающих крутопадающих месторождениях полезных ископаемых обычно применяется комбинированная от-

крыто-подземная разработка, которая может осуществляться параллельно (одновременно) и последовательно (разновременно). При последовательной открыто-подземной разработке верхняя часть зале-

жи разрабатывается открытым, нижняя – подземным способами. Обязательным условием проведения такой разработки является наличие переходного периода.

Решение вопросов перехода с открытых горных работ на подземные – одна из важных и сложных проблем комбинированной последовательной открыто-подземной разработки крутопадающих месторождений. Основные научно-технические вопросы этой проблемы наиболее полно сформулированы и выдвинуты еще в 50-х годах П.Э. Зурковым и Н.А. Стариковым. Эти вопросы актуальны и в настоящее время:

– создание научно обоснованных способов доработки последних горизонтов карьеров и подземные способы разработки первых (первого и второго) подкарьерных этажей;

– углубление и развитие методов определения границ открытой разработки с учетом повышения эффективности комбинированной разработки;

– создание способов совместного вскрытия карьерного и шахтного полей с одновременным дренажом и осушением месторождения.

Самым важным вопросом при этом является установление двух главных параметров комбинированной последовательной разработки конечной глубины карьера и границы перехода с открытых горных работ на подземные.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Большинство результатов исследований базируются на определении конечной глубины карьера H_k предусматривающих выполнение условия достижения минимума суммарных эксплуатационных затрат на разработку всего месторождения комбинированным открыто-подземным способом, т.е.

$$\Sigma Z = Z_o + Z_n \rightarrow \min, \quad (1)$$

где ΣZ – суммарные затраты на разработку месторождения, грн;

Z_o – затраты на разработку верхней части залежи глубиной H_k открытым способом, грн;

Z_n – затраты на разработку нижней части залежи (ниже дна карьера) подземным способом, грн.

При таком методологическом подходе к решению задачи по условию (1) формула для определения оптимальной величины карьера имеет вид

$$H_k = \frac{K_{cp} \cdot M_z}{2 \cdot ctg \beta_{cp}}, \quad (2)$$

где K_{cp} – граничный коэффициент вскрыши;

M_z – горизонтальная мощность залежи, м;

β_{cp} – средний угол откоса нерабочих бортов карьера, град.

Формула (2) получена исходя из решения плоской задачи (по профильному разрезу), т.е. объемы вскрыши и полезного ископаемого заменены на соответствующие их площади. Из формулы (2) следует, что средний коэффициент вскрыши при решении задачи таким способом будет равен $K_{cp}^s = 0,5K_{cp}$, поскольку

$$K_{cp}^s = H_k \cdot ctg \beta_{cp} / M_z.$$

Ранее выполненными в НГУ исследованиями [1] установлено, что определение величины K_{cp}^s и соответственно H_k по формуле (2) может быть приемлемо лишь для залежей большого простирания (больше 3 – 4 км) при соотношении длины L_d и ширины B_d карьерного поля по дну больше 5 – 10.

Для крутопадающих залежей, ограниченных по простиранию, к которым относятся кимберлитовые и полиметаллические месторождения (Стремигородское в Украине; Трубка мира, Молодежная и Сибайское в России; большое число кимберлитовых

вых месторождений в Африке и т.п), характерным является то, что отношение длины залежи по простиранию к ее мощности, т.е. $L_{\partial}/B_{\partial}$ находится в диапазоне от 1 до 3 – 5. Залежи с $L_{\partial}/B_{\partial}=1$ могут быть отнесены к штоко- или трубообразным. Методологический подход к определению конечной глубины карьера для таких месторождений должен предусматривать решение объемной задачи, т.е. с учетом трехмерного пространства, которое занимает карьерное поле.

При решении объемной задачи определения оптимальной конечной глубины карьера условие (1) представим в виде

$$\Sigma Z = C_{\partial}V_{\partial} + C_{\partial}V_{\partial} + C_n \cdot V_n \rightarrow \min, \text{ грн}, \quad (3)$$

где C_{∂} , C_{∂} и C_n – соответственно себестоимости 1 м³ вскрыши, добычи открытым и подземным способами, грн/м³,

V_{∂} , V_{∂} и V_n – соответственно объемы вскрыши, добычи открытым и подземным

$$\Sigma Z = C_{\partial} \left\{ \frac{\pi H_{\kappa}}{3} \left[(H_{\kappa} \cdot \text{ctg} \beta_{cp} + 0,5M_z)^2 + (H_{\kappa} \text{ctg} \beta_{cp} + 0,5M_z) 0,5M_z + (0,5 \cdot M_z)^2 \right] - \pi \cdot (0,5M_z)^2 H_{\kappa} \right\} +$$

$$+ C_{\partial} \cdot \pi \cdot (0,5M_z)^2 \cdot H_{\kappa} + C_n \cdot \pi (0,5M_z)^2 (H - H_{\kappa}) \rightarrow \min.$$

После преобразования получим

$$\Sigma Z = \frac{\pi}{3} C_{\partial} \cdot \text{ctg}^2 \beta_{cp} \cdot H_{\kappa}^3 + 0,5 \cdot \pi \cdot C_{\partial} \cdot \text{ctg} \beta_{cp} \cdot M_z \cdot H_{\kappa}^2 +$$

$$+ 0,25 \cdot M_z^2 \cdot \pi [C_{\partial} H_{\kappa} + C_n (H - H_{\kappa})] \rightarrow \min. \quad (9)$$

По аналитической зависимости (10) выполнен расчет для следующих исходных данных: $M_z = 500$ м; $H = 1000$ м; $\beta_{cp} = 45^{\circ}$; C_{∂} , C_{∂} и C_n соответственно равны 60, 100 и 280 грн/м³. Результаты расчетов представлены на рис. 1, из которого видно, что зависимость суммарных эксплуатационных затрат на разработку всего месторождения (до $H = 1000$ м) комбинирован-

способами, м³.

Объемы V_{∂} , V_{∂} и V_n для условий разработки штокообразных залежей представляются в виде

$$V_{\partial} = \frac{\pi}{3} H_{\kappa} (R^2 + r^2 + R \cdot r) - \pi \cdot H_{\kappa}, \text{ м}^3; \quad (4)$$

$$V_{\partial} = \pi r^2 \cdot H_{\kappa}, \text{ м}^3; \quad (5)$$

$$V_n = \pi \cdot (H - H_{\kappa}), \text{ м}^3, \quad (6)$$

где R и r – соответственно радиусы карьерного поля по поверхности и по дну, м;

$$R = H_{\kappa} \cdot \text{Ctg} \beta_{cp} + 0,5M_z; \quad (7)$$

$$r = 0,5M_z, \text{ м}; \quad (8)$$

H – глубина залегания штокообразного месторождения, м.

С учетом формул (4) – (8) условие (3) приобретает следующий вид

ным открыто-подземным способом имеет область экстремума, т.е. область минимума ΣZ , которая находится в диапазоне величин конечной глубины карьера $H_{\kappa} = 200 - 300$ м.

Для более четкого нахождения оптимальной глубины карьера H_{κ} продифференцируем это выражение по $d(H_{\kappa})$ и

приводим правую его часть нулю

$$\frac{d(\Sigma Z)}{d(H_k)} = \frac{\pi}{3} \cdot C_6 \cdot 3 \cdot H_k^2 \cdot \text{ctg}^2 \beta_{cp} +$$

$$+ 0,5\pi \cdot C_6 \cdot \text{Ctg} \beta_{cp} M_z \cdot 2H_k +$$

$$+ 0,25\pi \cdot M_z^2 \cdot C_\delta - 0,25\pi \cdot M_z^2 \cdot C_n = 0.$$

После упрощений получим квадратное уравнение

$$H_{k.opt} = \frac{-M_z \cdot \text{Ctg} \beta_{cp} + \sqrt{(M_z \text{Ctg} \beta_{cp})^2 + 4\text{Ctg}^2 \beta_{cp} \cdot 0,25 \cdot M_z^2 (1 + K_{cp})}}{2 \cdot \text{Ctg}^2 \beta_{cp}}, \text{ м.} \quad (10)$$

Упростив формулу (10), получим

$$H_{k.opt} = \frac{M_z \sqrt{1 + K_{cp}}}{2 \cdot \text{ctg} \beta_{cp}}. \quad (11)$$

Для вышеприведенных исходных данных получены графики зависимости

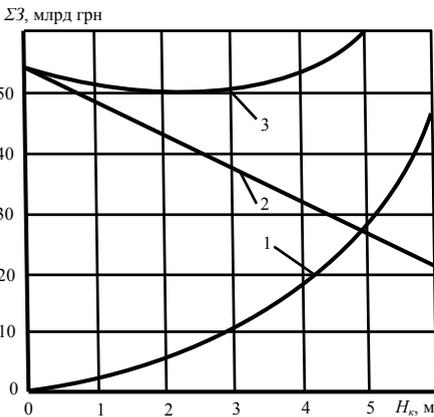


Рис. 1. График зависимости $\Sigma Z = f(H_k)$: 1, 2, 3 — соответственно затраты на открытую, подземную и комбинированную открыто-подземную разработки месторождения

Как видно из рис. 2, оптимальная величина $H_{k.opt}$ соответствует области минимальных значений суммарных затрат ΣZ

$$\text{ctg}^2 \beta_{cp} H_k^2 + \text{ctg} \beta_{cp} \cdot M_z \cdot H_k -$$

$$- \frac{C_n - C_\delta}{C_6} \cdot 0,25 \cdot M_z^2 = 0.$$

Учитывая, что $\frac{C_n - C_\delta}{C_6} = K_{cp}$, формула

для определения оптимальной конечной глубины карьера будет иметь вид

$H_{k.opt}$ от горизонтальной мощности залежи M_z для заданного диапазона изменения граничного коэффициента вскрыши $K_{cp} = (2 - 5) \text{ м}^3/\text{м}^3$ (рис. 2).

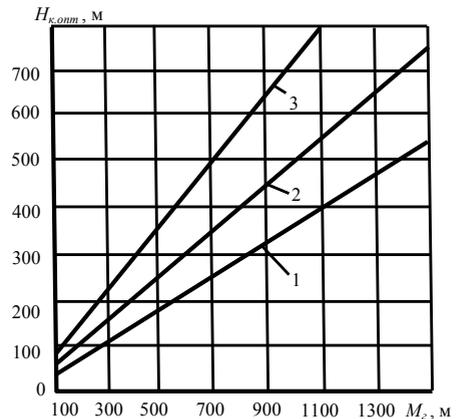


Рис. 2. Графики зависимости оптимальной конечной глубины карьера от горизонтальной мощности залежи: 1, 2 и 3 — соответственно при $K_{cp} = 2, 3$ и $5 \text{ м}^3/\text{м}^3$

(см. рис. 1).

Таким образом, для определения оптимальной конечной глубины карьера при комбинированной открыто-подземной раз-

работке штокообразных месторождений могут быть использованы как формула (9), так и формула (11), поскольку они дают однозначный ответ решения задачи. Однако формула (9) является более приемлемой в случае, когда удельные экономические показатели разработки месторождения C_v , C_d , C_n и средний угол откоса бортов карьера β_{cp} также зависят от рассматриваемой переменной H_k . В этом случае в формулу (9) вместо указанных величин подставляются их зависимости от H_k , т.е. $C_v = f_1(H_k)$, $C_d = f_2(H_k)$, $C_n = f_3(H_k)$ и $\beta_{cp} = f_4(H_k)$, которые устанавливаются эмпирическим путем [2]. При этом решение задачи усложняется.

В то же время при постоянных величинах C_v , C_d , C_n и β_{cp} следует применять установленную формулу (11), которая является простой в применении. Отсюда следует важный с научной и практической точек зрения вывод, что методологический подход к определению оптимальной конечной глубины карьера применительно к комбинированной открыто-подземной разработке штокообразных залежей основывается на принципе сравнения среднего коэффициента вскрыши с граничным, т.е. $K_{cp} < K_{zp}$, поскольку

$$\frac{H_{k.onm} \cdot Ctg\beta_{cp}}{M_z} = \frac{\sqrt{1+K_{zp}} - 1}{2}$$

или

$$K_{cp}^s = \frac{\sqrt{1+K_{zp}} - 1}{2}. \quad (12)$$

Результаты выполненных расчетов по формуле (12) для заданного диапазона изменения $K_{zp} = 2 - 5 \text{ м}^3/\text{м}^3$ показали, что K_{cp}^s в среднем составляет $0,16 K_{zp}$. Так при $K_{zp} = 2 \text{ м}^3/\text{м}^3$ величина $K_{cp}^s = 0,365$,

т.е. равна $0,18 K_{zp}$, а при $K_{zp} = 5$ величина $K_{cp}^s = 0,73$ или $K_{cp}^s = 0,14 K_{zp}$.

Таким образом, формула (11) в диапазоне изменения K_{zp} от 2 до $5 \text{ м}^3/\text{м}^3$ представляется в виде

$$H_{k.onm} = \frac{0,16 \cdot K_{zp} M_z}{ctg\beta_{cp}}, \text{ м.}$$

В общем случае установленная конечная глубина карьера не является границей перехода с открытых горных работ на подземные, поскольку она в пространстве и во времени может не совпадать с полным завершением (окончанием) горных работ и начинаться значительно раньше.

Началом перехода (во времени) на подземную разработку месторождения следует считать начало строительства подземного рудника. Исходя из условия равенства продолжительности строительства рудника и доработки карьера до экономической целесообразной глубины H_k (рис. 3), определяется текущая глубина карьера H'_{km} , которая соответствует началу строительства подземного рудника, т.е. началу перехода на подземную разработку

$$H'_{km} = H_k + \Delta H'_{km} - T_c \cdot h, \quad (13)$$

где $\Delta H'_{km}$ – приращение глубины карьера, зависящее от угла откоса рабочего борта φ_p , м,

$$\Delta H'_{km} = \frac{M_z - B_d}{2Ctg\varphi_p},$$

где T_c – продолжительность строительства подземного рудника, лет;

h_2 – скорость углубления карьера, м/год.

Год начала перехода на подземную разработку месторождения

$$t_c = t_2 + \frac{H'_{km} - H_{km}}{h_2},$$

где t_2 – год, в котором оценивается экономическая эффективность перехода с открытых работ на подземные.

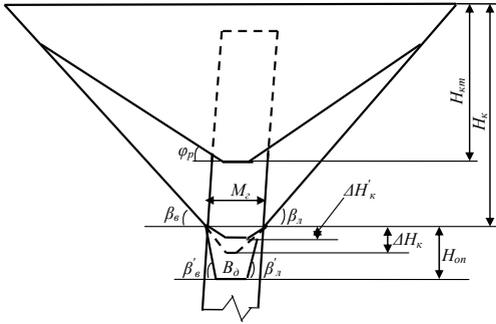


Рис. 3. К определению граничных параметров последовательной открыто-подземной разработки месторождения

В пространстве граница перехода на подземную разработку полезного ископаемого в общем случае

$$H_n = H_k - \Delta H_k,$$

где H_k – конечная глубина карьера, определяемая по формулам (9) или (11), м;

ΔH_k – углубление открытых работ по руде без разноса вскрышных бортов карьера, м.

Величина ΔH_k определяется в зависимости от горизонтальной мощности залежи M_2 , углов откоса нерабочих бортов карьера β_g и β_l и ширины его дна B_0 (см. рис. 3)

$$\Delta H_k = \frac{M_2 - B_0}{\text{Ctg}\beta_g + \text{Ctg}\beta_l}.$$

При разработке маломощных залежей (до 60 м) углублять карьер ниже предельной глубины ΔH_k нецелесообразно, поскольку значение ΔH_k будет незначительным, а небольшие параметры переходной зоны отрицательно влияют на эффективность горных работ и стабильную работу предприятия в этот период. При разработ-

ке мощных залежей помимо углубления карьера на ΔH_k открытым способом эффективным может быть совместное применение открытых и подземных работ [2]. В результате совмещения горных работ в переходной зоне образуется единое выработанное пространство, основными параметрами которого являются: высота переходной зоны H_{on} , углы откосов нерабочих бортов в переходной зоне соответственно со стороны висячего β'_g и лежащего β'_l боков залежи (см. рис. 3). В этом случае граница перехода на подземную разработку месторождения определится из выражения

$$H_n = \frac{H_k + M_2 - B_0}{\text{Ctg}\beta'_g - \text{Ctg}\beta'_l}, \text{ м.}$$

ВЫВОДЫ

Разработанный методологический подход к определению границ перехода с открытых горных работ на подземные для условий разработки штокообразных залежей полезного ископаемого может быть использован на всех стадиях проектирования карьера: 1) выполнении предпроектных научных исследований; 2) технико-экономическом обосновании строительства карьера; 3) выполнении технического проекта; 4) выполнении проектов реконструкции карьеров.

На первом этапе предварительно устанавливается граница перехода (H_n) по изложенной методике по критерию достижения минимальных суммарных эксплуатационных затрат на разработку всего месторождения.

На второй и третьей стадиях граница перехода устанавливается более детально с учетом дополнительных факторов: технологических, экономических, экологических и социальных. Окончательно граница перехода с открытых работ на подземные может быть установлена при выполнении проекта реконструкции карьера для дора-

ботки залежи в нижней и переходной его зонах и перехода на подземные работы. При этом необходимо учесть два главных фактора: 1) должна быть определена заранее (за 3 – 5 лет до выполнения проекта реконструкции) текущая глубина карьера (см. формулу (13), соответствующая началу переходного периода; 2) установление

динамики изменения удельных экономических показателей работы карьера по мере увеличения его глубины. Заранее установленная граница перехода с открытых на подземные работы позволит повысить экономическую эффективность комбинированной разработки месторождения в целом.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуменик И.Л. Развитие методологических подходов к решению задач по установлению конечных контуров карьера / И.Л. Гуменик, А.М. Маевский, Н.В. Несвистайло // Науковий вісник НГУ. – 2007. – № 6. – С. 57 – 59.

2. Параметры комплексной разработки месторождений / [Черных А.Д., Калишевский И.А., Маевский А.М. и др.]. – Д.: Сич, 1993. – 318 с.

ОБ АВТОРАХ

Маевский Анатолий Марьянович – к.т.н., доцент кафедры открытых горных работ Национального горного университета.

Несвистайло Николай Владимирович – к.т.н., доцент кафедры открытых горных работ Национального горного университета.

Собко Борис Ефимович – д.т.н., профессор кафедры открытых горных работ Национального горного университета.

