

УДК 622. 271

А.М. Бабец, В.Л. Копылов

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ МИНИМИЗАЦИИ СРОКА ОТРАБОТКИ ЗАПАСОВ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ ПРОТЯЖЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Изложена методика по аналитическому обоснованию критерия минимизации срока разработки запасов протяженных узких месторождений, позволяющая определить максимально возможную годовую производительность карьера по добыче руды и оптимальное положение разрезной траншеи, обеспечивающей реализацию данного критерия.

Ключевые слова: критерий оптимизации, объем вскрышных пород, протяженное месторождение.

Семинар № 17

При проектировании вновь отрабатываемых месторождений полезных ископаемых открытым способом стремятся использовать оптимальный критерий развития горных работ – минимум объемов вскрышных пород (минимум текущего коэффициента вскрыши), позволяющего при разработке первоначального участка месторождения уменьшить объем вскрышных горно-капитальных работ, необходимых для пуска карьера в эксплуатацию на проектную мощность.

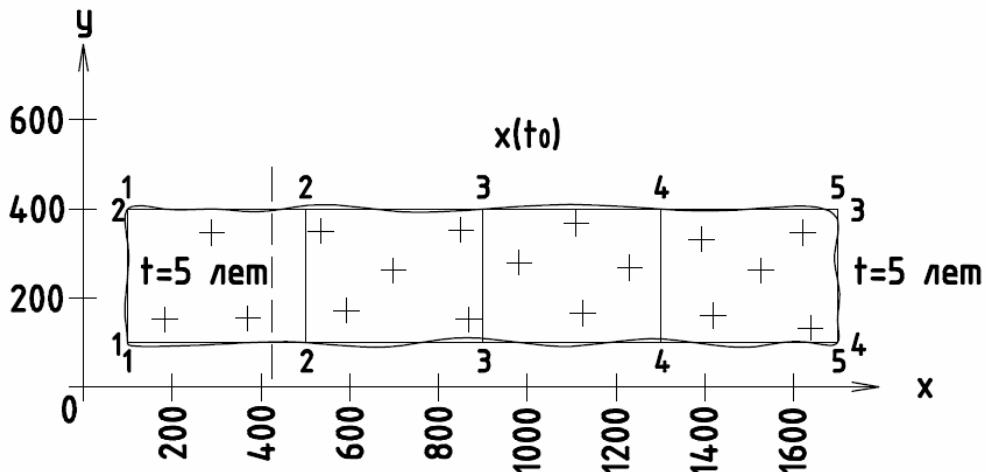
Хотя минимальный коэффициент вскрыши и является важным, но не единственным фактором, влияющим на эффективность добывчных работ при открытом способе разработки, поэтому необходимо дополнительно обосновать и использовать другие критерии оптимизации горных работ.

Особенно важно обоснование других критериев оптимизации при разработке протяженных по простиранию и узких вкрест простирания месторождений полезных ископаемых. К таким месторождениям, например,

можно отнести Приоскольское месторождение железных руд Курской Магнитной Аномалии, характеризующееся размерами по длине 4,3 км, по ширине от 400 м до 750 м.

При использовании для подобных месторождений только одного критерия минимизации объемов вскрышных пород, необходимых для пуска карьера в эксплуатацию без учета других факторов, может привести к снижению эффективности горных работ на последующих этапах разработки запасов месторождения, к снижению производственной мощности карьера по добыче руды и крайне неравномерному режиму добывчных работ и др.

В этой связи возникает задача по обоснованию и использованию других оптимальных критерий развития горных работ: по минимизации сроков отработки запасов месторождения, определения оптимальных положений разрезных траншей, максимально возможной производительности карьера по добыче руды в тече-



простыми линейными границами:

- фактическая граница месторождения и ее аппроксимация;
- 2** — ось разрезной траншеи;
- x(t₀)** — оптимальное положение разрезной траншеи ($x = 900$ м);
- разрезная траншея с координатами $x = 425$ м.

ние всего периода разработки месторождения.

Такое обоснование названных критерииев выполним на примере условного протяженного и узкого месторождения с простыми (прямолинейными) границами (рис. 1). При его разработке параллельными поперечными фронтами, развивающими по простирианию залежи.

Согласно плана залежи (рис.1) устанавливаем ее размеры: длина $l = 1600$ м, ширина $d = 300$ м, мощность залежи $m = 50$ м. Объем запасов месторождения $Z_0 = l d m = 24$ млн м³. Уравнения границ месторождения: северной $y_2 = 400$ м, южной границы $y_1 = 100$ м, левой границы (начальной) $x_1 = 100$ м, правой границы (конечной) $x_2 = 1700$ м.

Возникает вопрос, как разрабатывать месторождение, в каком направлении, в какой последовательности, с какими скоростями должны отрабатываться запасы месторождения и

подвигаться фронта горных работ, в каком месте месторождения заложить разрезную траншею (первоначальный участок разработки), чтобы полная отработка запасов месторождения была произведена за минимальный срок, что с другой стороны означает отработку запасов выполнить с максимально возможной годовой производительностью по добыче руды.

Для этого рассмотрим на плане месторождения (рис. 1) фиксированную последовательность вариантов расположения осей разрезных траншей: с координатами $X = X_1 = 100$ м, $X = X_2 = 500$ м, $X = X_3 = 900$ м, $X = X_4 = 1300$ м, $X = X_5 = 1700$ м, где $X_1 = X_h$, $X_5 = X_k$ — начальное и конечное положение осей траншеи. По каждому варианту расположения траншей оценим время разработки запасов месторождения и производственную мощность по добыче руды.

Вариант 1. Положение разрезной траншеи определяется координатами

$X_1/t=0 = 100$ м. В этом случае движение фронта горных работ производится от левой начальной границы к правой конечной границе месторождения. При одностороннем движении фронтов горных работ (исходя из длины фронта рабочих горизонтов и расстановки экскаваторов на горизонтах) годовую производительность по добыче руды установим в объеме $q = 2,4$ млн м³.

В связи этим срок при односторонней отработке запасов месторождения составит

$$T = \frac{3}{q} = 10 \text{ лет.}$$

Вариант 2. Положение оси разрезной траншеи определена координатами $X_2/t=0 = 500$ м.

При данном положении траншеи месторождение делится на две части. Развитие фронтов горных работ будет двухстороннее: в левую часть залежи до начальной границы $X = X_1$ и правую до конечной границы $X = X_5$. В левой части отрабатываются запасы $Z_n = (X_2 - X_1)/l d m = 6$ млн м³, правой части – $Z_{n\pi} = (X_5 - X_2)/l d m = 18$ млн м³. Время разработки запасов левой

части залежи $t_{n\pi} = \frac{Z_n}{q} = 2,5$ года, пра-

вой части – $t_{n\pi} = \frac{Z_{n\pi}}{q} = 7,5$ года.

При заданном положении разрезной траншеи $X/t=0 = 500$ м левая часть запасов месторождения отрабатывается за 2,5 года, а правая за 7,5 года. Значит, полная отработка запасов месторождения произойдет за 7,5 лет со средней годовой производительностью по добыче руды

$$q = \frac{3}{t_{n\pi}} = 3,2 \text{ млн м}^3/\text{год.}$$

Вариант 3. Положение разрезной траншеи определено координатами

$X_3/t=0 = 900$ м. При данном положении оси траншеи месторождение делится на две части с развитием фронтов горных работ в противоположных направлениях. В левой части отрабатываются запасы $Z_n = (X_3 - X_1)/l d m = 12$ млн м³, правой части $Z_{n\pi} = (X_k - X_3)/l d m = 12$ млн м³. Соответственно, время отработки запасов в левой части $t_3 = \frac{Z_n}{q} = 5$ лет и в правой части

$$t_3 = \frac{Z_{n\pi}}{q} = 5 \text{ лет. Следовательно, время}$$

отработки запасов месторождения составляет как для левой и правой части 5 лет, а годовая производительность месторождения по добыче руды составит $q_3 = \frac{Z_o}{t_3} = 4,8$ млн м³/год.

Вариант 4. Положение разрезной траншеи определено координатами $X_4/t=0 = 1300$ м. Объем разработки запасов месторождения левой части составляет $Z_{4n} = (X_4 - X_1)/l d m = 18$ млн м³, а правой части $Z_{4n\pi} = (X_n - X_1)/l d m = 6,0$ млн м³. Время отработки запасов левой части левой части

$$t_{4n} = \frac{Z_{4n}}{q} = 7,5 \text{ лет, а правой части}$$

$$t_{4n\pi} = \frac{Z_{4n\pi}}{q} = 2,5 \text{ года.}$$

Соответственно время полной отработки месторождения при заданном положении оси разрезной траншеи составит 7,5 года при средней годовой производительности карьера по добыче руды $q_4 = \frac{Z_o}{t_{4n}} = 3,2$ млн/год.

На основе анализа рассмотренных вариантов положений разрезных траншей можно заключить, что при

положении оси траншеи с координатами $X_3 = 900$ м срок разработки запасов наименьший $t_4=5$ лет, годовая производительность по добыче руды наибольшая $q_3 = 4,8$ млн м³/год.

Исходя из изложенного, можно сформулировать принципы минимизации срока разработки запасов протяженных месторождений:

- разработку месторождений необходимо производить с двухсторонним развитием фронтов горных работ;
- одновременно разработку запасов необходимо производить от положения оси разрезной траншеи, располагающейся в центральной части месторождения и делящую запасы месторождения на две равновеликие по объемам части;
- одновременный выход фронтов горных работ на конечные границы месторождения;
- время отработки каждой части месторождения должно быть одинаковым;
- скорость разработки запасов каждой части также должно быть одинаковым, что обеспечивает равномерный режим добывчих работ за весь период разработки месторождения;
- въездная траншея по вскрытию месторождения должна примыкать к центральной части месторождения (к оптимальному положению разрезной траншеи).

В математической постановке обоснование минимального срока разработки запасов месторождения t_0 и максимальной годовой производительности карьера по добыче руды q_0 решается следующим методом. На плане месторождения (рис. 1) рассмотрим не отдельные фиксированные положения осей (плоскостей) разрезных траншей, а все их множе-

ство $X \subset [X_h, X_k]$, чтобы из них найти единственное оптимальное положение траншеи с координатами X_0 . Для чего опишем движение оси разрезных траншей из начального положения оси $X|_{t=0} = X_h$ в конечное $X|_{t=0} = X_k$ дифференциальным уравнением:

$$\frac{dx}{dy} = V \text{ при } X|_{t=0} = X_h. \quad (1)$$

Проинтегрировав данное уравнение (1) получим закономерности изменения положения осей разрезных траншей во времени

$$X(t) = X_h + Vt. \quad (2)$$

Значение скорости перемещения осей траншеи V определим исходя из длины рудной залежи $l = X_k - X_h$ и времени затрачиваемого на перемещение осей траншеи из начального X_h в конечное X_k положение.

$$V = \frac{X_k - X_h}{T} = 160 \text{ м/год.}$$

В связи с этим уравнение (2) принимает вид

$$X(t) = X_h + \frac{X_k - X_h}{T} \cdot t = 100 + 160 t. \quad (3)$$

Зафиксировав любое значение времени $t = t_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$ мин) получим на плане месторождения любое положение оси траншеи. Получив закономерность изменения положений осей разрезных траншей во времени, определим аналитическую зависимость изменения отрабатываемых объемов руды по мере подвигания осей траншеи:

$$Q(t) = m \int_{X_1}^{X_1+Vt} \left(\int_{y_1}^{y_2} dx \right) dy = \\ = m(y_2 - y_1)Vt = 2,4 \text{ млн м}^3 \cdot t. \quad (4)$$

Исходя из рассмотренного выше принципа того, что оптимальное положение оси разрезной траншеи делит запасы месторождения – Z_0 на две равные части составим уравнение:

$$m \cdot (y_2 - y_1) \cdot Vt = 0,5 Z_0, \quad (5)$$

из решения, которого определим минимальное значение срока t_0 разработки запасов рассматриваемого месторождения:

$$t_0 = \frac{0,5Z_0}{m(y_2 - y_1)V} = 5 \text{ лет}. \quad (6)$$

По формуле (3) с учетом значения t_0 определим оптимальное положение осей разрезной траншеи на плане месторождения

$$x(t_0) = X_H + V \cdot t_0 = 900 \text{ м}, \quad (7)$$

а затем и максимально возможную годовую производительность по добыче руды при равномерном режиме ее добычи по формуле:

$$Q(t_0) = \frac{m}{t_0} \left[\int_{X_1}^{X_1+Vt_0} \left(\int_{Y_1}^{Y_2} dy \right) dx + \int_{X_1+Vt_0}^{X_{K_r}} \left(\int_{Y_1}^{Y_2} dy \right) dx \right] = 4,8 \text{ млн м}^3/\text{год}. \quad (8)$$

Выполним контрольную проверку одного из основных условий минимизации срока отработки запасов месторождения – одновременности выхода фронтов добычных работ на конечные границы месторождения.

Время выхода фронта работ на конечную левую границу месторождения

$$t_L = \frac{m}{q_L} \cdot \int_{X_H}^{X_0} \left(\int_{Y_1}^{Y_2} dy \right) dx = 5 \text{ лет}. \quad (9)$$

Время выхода фронта на правую конечную границу

$$t_R = \frac{m}{q_R} \cdot \int_{X_0}^{X_K} \left(\int_{Y_1}^{Y_2} dy \right) dx = 5 \text{ лет}. \quad (10)$$

Одновременность выхода фронтов к границам месторождения подтверждается.

На основании вышеизложенного можно заключить, что рассматриваемое протяженное и узкое месторождение отрабатываются за минимальный срок времени 5 лет, с максимально возможной годовой производительностью при равномерном режиме добычи руды 4,8 млн м³ в год и при оптимальном положении разрезной траншеи $X_0 = 900$ м.

При расположении разрезной траншеи на данном месторождении в другом месте с координатой $X = 450$ м (например, установленной по минимуму объемов вскрышных горно-капитальных работ, необходимых для пуска карьера в эксплуатацию), срок полной отработки запасов составит $t = 7,8$ лет, годовая производительность по добыче руды $Q = 3,07$ млн год. При этом режим добычных работ будет крайне неравномерный: за период 0 до 2,187 лет среднегодовая производительность составит 4,8 млн м³ за год, а за период с 2,187 до 7,81 лет – 2,4 млн м³ в год.

Функциональные связи по определению минимума срока отработки запасов протяженных и узких месторождений установлены для простых, прямолинейных конфигураций границ месторождений, как в плане, так и по глубине.

Но эти аналитические зависимости можно обобщить для протяженных месторождений с любой конфигурацией границ и изменчивостью мощности рудных залежей. Эффективным способом представления таких границ в аналитическом виде является аппроксимация границ месторожде-

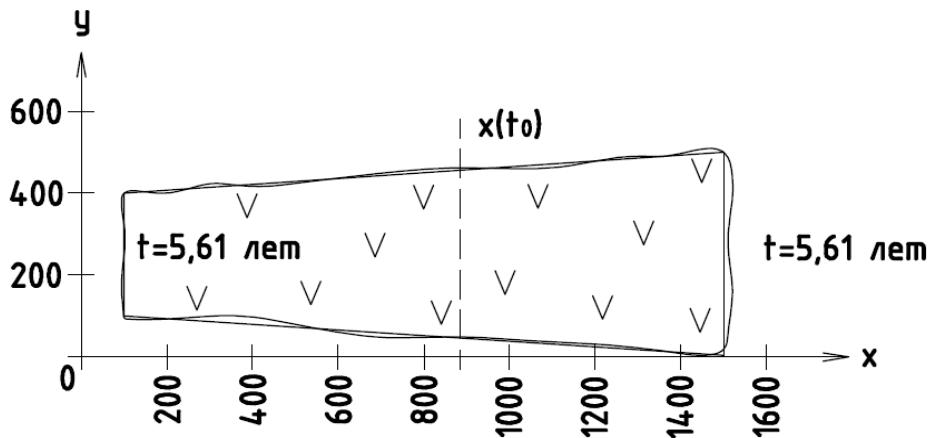


Рис. 2. Схема оптимального положения разрезной траншеи для протяженного месторождения с более сложными границами:

— фактическая граница месторождения и ее аппроксимация;
— — — — оптимальное положение разрезной траншеи $x(t_0) = 886$ м.

ния полиномами $Y_i = a_{0i} + a_{1i}x + a_{2i}x^2 + \dots + a_{mi}x^m$ методом наименьших квадратов по точкам с координатами x_i, y_i , снятых с плана границ месторождения. Решим подобную задачу с более сложной конфигурацией границ месторождения (рис. 2). Параметры месторождения: длина $l = 1400$ м, ширина в западной части залежи $d_1 = 300$ м, в восточной части $d_2 = 500$ м, мощность залежи $m = 50$ м; объем запасов $Z_0 = 28$ млн м³. Уравнение левой границы залежи $x_1 = 100$ м, уравнение правой границы $x = 1700$ м. Уравнение границ месторождения по северной и южной частям месторождения определим по методу наименьших квадратов по координатам точек снятых с границ плана (рис. 2): северной границы $y_2 = a_0 + a_1x = 392,857 + 0,0714 \cdot x$, по южной — $y_1 = b_0 + b_1x = 107,14 + 0,0714 \cdot x$.

Скорость движения осей фронта работ $V = 140$ м/год. С учетом рассмотренных условий (4) установим закономерности изменения объемов добычи руды по мере подвигания осей траншеи:

$$Q(t) = m \int_{X_1}^{X_1+Vt} \left(\int_{y_2=b_0+b_1x}^{y_2=a_0+a_1x} dy \right) dx = A_0vt + A_1v^2t^2, \quad (11)$$

где $A_0 = m [(a_0 - b_0) + (a_1 - b_1)x_1]$;
 $A_1 = 0,5m(a_1 - b_1)$.

Приравняв данное уравнение половине объемов запасов месторождения $0,5Z_0$ получим уравнение:

$$A_1V^2t^2 + A_0Vt = 0,5Z_0, \quad (12)$$

из решения, которого, получим минимальное значение срока t_0 разработки данного месторождения:

$$t_0 = \frac{A_0}{2A_1V} \pm \sqrt{\left(\frac{A_0}{2A_1V}\right)^2 + \frac{0,5Z_0}{A_1V^2}} = 5,61 \text{ года.} \quad (13)$$

Оптимальное положение оси разрезной траншеи составит:

$$X(t_0) = X_1 + Vt_0 = 886,2 \text{ м.}$$

Максимально возможная годовая производительность по добыче руды:

$$q_0 = \frac{Z_0}{t_0} = 4,986 \text{ млн м}^3 \text{ в год при рав-}$$

номерном режиме добычных работ за весь период эксплуатации карьера от 0 до 5,61 лет.

Таким образом, предложенная методика аналитического обоснования критерия минимизации срока разработки запасов протяженных и узких месторождений позволяет:

- сократить сроки разработки запасов месторождения;
- установить максимально возможную годовую производительность карьера по добыче руды;

• обосновать равномерный режим добычных работ за весь период эксплуатации месторождения;

• обосновать оптимальное положение разрезной траншеи (первоначального участка разработки месторождения) и прилегающих к участку вскрывающих выработок.

Реализация предложенной методики позволит обеспечить стабильную и экономически эффективную разработку протяженных и узких месторождений полезных ископаемых открытым способом. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Бабец А.М. – заместитель генерального директора по научной работе, заведующий лабораторией рационального природопользования и экологической безопасности

Копылов В.Л. – ведущий инженер лаборатории рационального природопользования и экологической безопасности

ОАО «Научно-исследовательский институт по проблемам КМА им. Л.Д. Шевякова» (НИИКМА), г. Губкин, niiikma@mail.ru



СЛУЧАИ ИЗ ЖИЗНИ ПРОФЕССОРА ПЕТЬКИНА

Ошибочка вышла

Шел 1955 год. Студент Петъкин почуял свободу, перестал ходить на занятия, в общежитие приходил сильно навеселе. Друзьям это нравилось, но в деканате уже слышался ропот. Декан Сигизмунд Моисеевич, ряный борец за дисциплину, на втором курсе лишил Петъкина стипендии, но тот все не унимался. Надо сказать, что декан был немолод, мал ростом и практически лыс. Правда, утром перед зеркалом на потеху случайным зрителям он любил минут десять причесывать полтора десятка сохранившихся на голове волос и делать едкие замечания проходившим мимо студентам.

И вот Сигизмунд Моисеевич через месяц совершенно забыл, что еще в сентябре лишил Петъкина стипендии. Снова издает приказ о лишении этого прогульщика стипендии. Тогда какой-то остроумный художник рисует такую карикатуру: стоит, прикрываясь руками, совершенно голый Петъкин, а декан наставил на него пистолет и командует: «Раздевайся!» Полдня эта карикатура висела на стене, а потом ее сорвали дружинники.

Нарисовано было здорово. Жаль не удалось сохранить ее для истории.

Из книги Л.Х. Гитиса «Верхом на тигре». М.: Горная книга, 2009. С.201