Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXIII, вып. 1, 1972 г.

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ОПТИМАЛЬНОСТИ НАПРАВЛЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ В КАРЬЕРЕ

А. И. Арсентьев

Одним из важнейших решений при проектировании карьеров является выбор направления и интенсивности перемещения горных работ в горизонтальном направлении и в глубину. Эти вопросы обычно решаются при установлении способа вскрытия карьерного поля и календарного плана горных работ. Осуществленное на месторождении вскрытие надолго, а иногда навсегда, предопределяет порядок и эффективность работы карьера.

При установлении способа вскрытия и направления развития работ нужно оценивать две стороны этого процесса: а) объем, стоимость и продолжительность осуществления горных работ по вскрытию месторождения; б) экономические, технические и организационные последствия принятого способа вскрытия, места заложения вскрывающих выработок и направления развития работ. В соответствии с этими особенностями выбираются и критерии оценки способов вскрытия.

Можно сравнивать капитальные затраты на проведение вскрывающих выработок и отдавать предпочтение варианту с наименьшими затратами. Но за счет капитальных затрат проходится только часть вскрывающих выработок и, во многих случаях, не самая большая.

От способа вскрытия зависят во многом затраты на горнокапитальные работы в период строительства и на выемку пород и полезного ископаемого в процессе эксплуатации. В зависимости от места расположения вскрывающих выработок и направления развития горных работ в пределах карьерного поля изменяются во времени объемы вскрышных работ, качество полезного ископаемого, фронт работ по вскрыше и добыче и другие не менее важные параметры карьера. В конечном счете способ вскрытия влияет на границы и производительность карьера.

Учитывая все это, наиболее общим критерием при оценке эффективности способа вскрытия является максимум приведенной прибыли

$$Э = \sum_{i=-t}^{T} Ц_i - \sum_{i=-t}^{T} З_i + \sum_{i=-t}^{T} О_i \longrightarrow \max, \qquad (1)$$

где $Э$ и $\sum_{i=-t}^{T} Ц_i$ — приведенные к моменту сдачи карьера в эксплуатацию соответственно суммарные прибыль и ценность полученной продукции, руб.; $\sum_{i=-t}^{T} З_i$ — сумма приведенных затрат на разработку место-

рождения, руб.; $\sum_{i=-t}^{T} O_i$ — приведенная остаточная реализуемая стоимость основных фондов, руб; t, T — соответственно продолжительность строительства и эксплуатации карьера, годы.

Приведенная к моменту окончания строительства ценность продукции может быть выражена уравнением

$$\sum_{i=-t}^{T} Ц_i = (Ц_I \Delta^{t-1} + Ц_{II} \Delta^{t-2} + \cdots + Ц_t) + (Ц_1 \Delta^{-1} + Ц_2 \Delta^{-2} + \cdots + Ц_T \Delta^{-T}), \quad (2)$$

где $Ц_I$, $Ц_{II}, \ldots, Ц_t$ — ценность полезной продукции с первого до последнего t года строительства, руб.; $Ц_1, Ц_2, \ldots, Ц_T$ — то же, с первого до последнего T года эксплуатации, руб.; $\Delta = 1 + E_н$ — коэффициент приведения; $E_н$ — нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, 1/год.

Приведенная сумма затрат

$$\sum_{i=-t}^{T} З_i = \sum_{i=-t}^{T} K_i + \sum_{i=1}^{T} C_i, \quad (3)$$

где $\sum K$ и $\sum C$ — капитальные и эксплуатационные затраты, руб. В свою очередь

$$\sum_{i=-t}^{T} K_i = (K_I \Delta^{t-1} + K_{II} \Delta^{t-2} + \cdots + K_t) + (K_1 \Delta^{-1} + K_2 \Delta^{-2} + \cdots + K_T \Delta^{-T}), \quad (4)$$

где K_I, $K_{II}, \ldots, K_t$ — капитальные затраты во все годы строительства, руб.; $K_1, K_2, \ldots, K_T$ — то же, во все годы эксплуатации, руб.

Эксплуатационные затраты целесообразно разбить на две группы: по добычным $\sum C_{д_i}$ и вскрышным $\sum C_{в_i}$ работам.

Тогда

$$\sum_{i=1}^{T} C_{д_i} = C_{д_2} \Delta^{-1} + C_{д_2} \Delta^{-2} + \cdots + C_{д_T}^{-T}; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{T} C_{в_i} = C_{в_1} \Delta^{-1} + C_{в_2} \Delta^{-2} + \cdots + C_{в_T}^{-T}, \quad (6)$$

где $C_{д_1}, C_{д_2}, \ldots, C_{д_T}$ — затраты на добычные работы во все годы эксплуатации, руб.; $C_{в_1}, C_{в_2}, \ldots, C_{в_T}$ — то же, на вскрышные работы, руб.

Нужно иметь в виду, что в эксплуатационные затраты не включается в данном случае амортизация [2].

В ответственных расчетах, кроме показателей эффективности затрат, необходимо учитывать фактор технического прогресса. По формуле В. С. Хохрякова [3] этот фактор может быть учтен приближенно:

$$C_{д_t} = C_{д_0} \delta_д^t; \quad (7)$$

$$C_{в_t} = C_{в_0} \delta_в^t, \quad (8)$$

где $C_{д_0}$, $C_{в_0}$ — себестоимость добычных и вскрышных работ в исходном году, *руб./т*; $C_{д_t}$, $C_{в_t}$ — то же, через t лет, *руб./т*; $\delta_д$, $\delta_в$ — коэффициенты, учитывающие ежегодное снижение себестоимости ($\delta_д < 1$; $\delta_в < 1$).

Учет в эксплуатационных затратах влияния технического прогресса может быть осуществлен заменой в формулах (5) и (6) коэффициента

$$\Delta = 1 + E_н$$

коэффициентом

$$\Delta' = \frac{1 + E_н}{\delta_д}.$$

Чтобы лучше уяснить влияние способа вскрытия на процесс формирования затрат, рассмотрим карьер в трех проекциях (рис. 1). Примем,

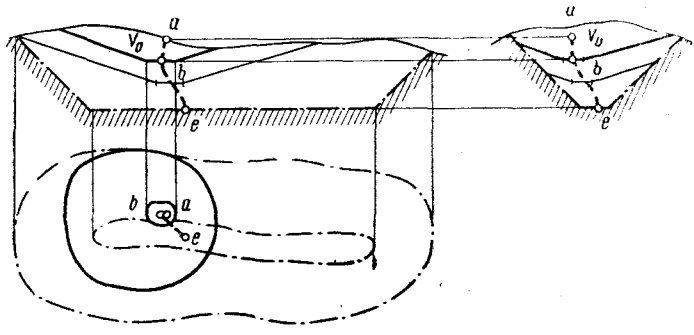


Рис. 1. Карьер в трех проекциях
Линия *abe* — направление углубки

что строительство карьера начинается в точке *a*, а затем в процессе углубки дно карьера перемещается вниз по траектории *abe*. Линия *abe* является *направлением углубки карьера*. Это направление во многом предопределяет способ вскрытия. Так, в данном случае вскрытие должно осуществляться временными съездами.

По мере углубки по линии *abe* и вскрытия все новых и новых горизонтов горные работы сначала достигают полезного ископаемого (точка *в*) и карьер сдается в эксплуатацию, т. е. определяется объем горно-капитальных работ V_0, затем идет наращивание производительности и выход на проектную производительность карьера. По мере углубки карьера изменяется соотношение объемов пустых пород и полезного ископаемого, длины фронтов работ, качество полезного ископаемого.

Очевидно, что в общем случае имеется много возможных направлений углубки, и для выбора способа вскрытия нужно найти наилучшее направление, отвечающее критерию эффективности.

Взаимосвязанность всех показателей процесса разработки месторождений — очень важное, но и неприятное для расчетов свойство. Поэтому воспользоваться уравнением (1) можно только после детальных расчетов. Кроме этого, действующие цены на руду и концентрат не отличаются совершенством. Не всегда достоверны наши знания о месторождении. Поэтому разумно воспользоваться более простыми критериями для оценки эффективности способов вскрытия.

Проанализируем полученные уравнения и постараемся их упростить.

Если определены границы карьерного поля, то во всех вариантах вскрытия общие объемы пустых пород и полезного ископаемого будут одинаковыми. А это значит, что абсолютная суммарная ценность полученной продукции $Ц_а$ и абсолютные суммарные затраты $З_а$ на разработку месторождения (без учета фактора времени) будут также примерно одинаковыми. На графике функции $З_а = f_1(Ц_а)$ мы можем

сравнительно просто получить начальную и конечную точки (*O* и *B* на рис. 2). Отметим, что разность $Ц_а - З_а = Э_а$ является абсолютной величиной прибыли. Переход из точки *O* в точку *B* по мере отработки карьера в одном из вариантов идет по какой-то линии *ONB*. Задача сводится к поиску такой стратегии развития горных работ, при которой будет обеспечен максимум прибыли с учетом фактора времени и технического прогресса.

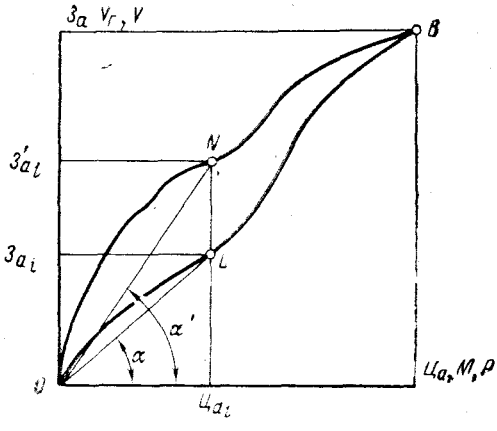


Рис. 2. Кумулятивный график функций $З_а = f_1(Ц_а)$, $V_г = f_2(M)$, $V = f_3(P)$

Исследования подобных кумулятивных кривых [1] показали, что наилучшему варианту соответствует самое низкое из всех возможных положений кривой $З_а = f_1(Ц_а)$. Так, из двух линий *ONB* и *OLB* бóльшую эффективность имеет вариант работы карьера, характеризующийся линией *OLB*, так как всегда целесообразно бóльшую часть затрат произвести в более позднее время.

Принцип максимума общей приведенной прибыли, как следует из рис. 2, можно заменить более простым принципом минимума (на любое время разработки месторождения) величины

$$\mu_{1_i} = \frac{З_{a_i}}{Ц_{a_i}} \longrightarrow \min, \tag{9}$$

где $З_{a_i}$ — абсолютные затраты на разработку месторождения с начала строительства до данного (i-й год) времени (нарастающий итог), руб.; $Ц_{a_i}$ — абсолютная стоимость полученной за это время продукции, руб.

На графике $З_а = f_1(Ц_а)$ величина $\mu_{1_i} = \operatorname{tg}\alpha_i$.

Если в карьере добывается комплексное полезное ископаемое изменяющегося качества (или несколько полезных ископаемых), то по оси абсцисс при выборе вариантов очевидно нужно откладывать величину $Ц_{a_i}$. Если же добывается однокомпонентное полезное ископаемое переменного качества, то можно воспользоваться тем обстоятельством, что ценность в большинстве случаев прямо пропорциональна количеству извлекаемого из добываемого полезного ископаемого полезного компонента:

$$Ц_{a_i} = a_1 M'_i + b_1, \tag{10}$$

где M'_i — количество извлекаемого полезного компонента в добытом до данного времени (i-й год) полезном ископаемом, т; a_1, b_1 — коэффициенты.

Для многих месторождений установлены корреляционные связи между основными и сопутствующими компонентами в полиметаллических рудах. Это позволяет также считать, что ценность прямо пропорциональна извлекаемому количеству основного металла и пользоваться уравнением (10). Естественно, что ценность единицы в этом случае выше, т. е. коэффициенты a_1 и b_1 имеют бóльшую величину.

Пользоваться показателем извлекаемого металла трудно, так как зачастую при проектировании неизвестна полная характеристика обогатимости полезного ископаемого в зависимости от содержания и вещественного состава. Поэтому с некоторой погрешностью можно принимать, что количество извлекаемого металла прямо пропорционально его содержанию в полезном ископаемом. В этом случае можно пользоваться количеством основного металла, содержащегося в добываемом полезном ископаемом M_i и откладывать его по оси абсцисс.

По оси ординат тоже можно откладывать не стоимостные, а натуральные величины, если провести некоторые упрощения. Капитальные затраты складываются из затрат на приобретение оборудования и на горнокапитальные работы, состоящие, в основном, из горнокапитальной вскрыши. Капитальные затраты пропорциональны объемам работ. То же с еще большим приближением относится к эксплуатационным затратам. Все это позволяет предположить, что абсолютные (без учета фактора времени) затраты на разработку месторождения к данному моменту времени прямо пропорциональны объемам горной массы:

$$З_{а_i} = a_2 V_{г_i} + b_2, \tag{11}$$

где $V_{г_i}$ — объем горной массы, вынутой до данного момента (i-й год), $м$; a_2, b_2 — коэффициенты.

Тогда можно сформулировать еще более простой принцип оценки:

$$\mu_{2_i} = \frac{V_{г_i}}{M_i} \longrightarrow \min. \tag{12}$$

На кумулятивном графике $V_г = (f_2) M$ линия, соответствующая наиболее эффективному варианту, будет занимать также самое низкое положение, а $\mu_{2_i} = \operatorname{tg} \alpha_i$.

Можно уточнить решение, если вместо физических объемов горной массы откладывать по оси ординат приведенные по стоимости объемы.

Представим себе, что до какого-то момента вынимается объем горной массы

$$V_{г_i} = V_0 + V_i + P_i, \tag{13}$$

где V_0, V_i, P_i — объемы горнокапитальной вскрыши, вскрышных и добычных работ до данного периода.

Если себестоимости этих работ равны соответственно $c_{гк}$, $c_в$, $c_д$, то общие затраты

$$З_{а_i} = c_{гк} V_0 + c_в V_i + c_д P_i. \tag{14}$$

Разная себестоимость выемки различных видов пород и полезного ископаемого может быть обусловлена как разными свойствами горных пород, так и различиями в технологии их выемки. Примем за основу себестоимость вскрышных работ $c_в$, тогда

$$З_{а_i} = c_в \left(\frac{c_{гк}}{c_в} V_0 + V_i + \frac{c_д}{c_в} P_i \right), \tag{15}$$

или

$$З_{аi} = c_в (V_0' + V_i' + P_i'), \tag{16}$$

где V_0', V_i', P_i' — приведенные объемы.

Тогда по оси ординат можно откладывать величину

$$V_г' = V_0' + V_i' + P_i'. \tag{17}$$

При разработке месторождений со сравнительно стабильным качеством полезного ископаемого ценность полученного продукта прямо пропорциональна количеству добытого полезного ископаемого:

$$Ц_{э_i} = a_э P_i + b_э, \tag{18}$$

где $a_э$, $b_э$ — коэффициенты.

Так как рассматриваемые варианты вскрытия относятся к одному и тому же карьеру, то коэффициенты $a_э$ и $b_э$ одинаковы для всех вариантов, и по оси абсцисс можно откладывать объем добытого до данного времени полезного ископаемого.

Применение показателя P_i может быть распространено также на довольно частые случаи, когда в процессе разработки месторождения удается усреднять качество выдаваемого из карьера полезного ископаемого.

Затраты на добычные работы (при обычном условии равенства проектной производительности карьера по полезному ископаемому при всех вариантах вскрытия) практически одинаковы при всех вариантах и могут не рассматриваться. Тогда основным изменяющимся параметром будут затраты на вскрышные работы и можно написать, что

$$З_{а_i} = a_4 V_i + b_4, \tag{19}$$

где a_4, b_4 — коэффициенты. Значит, по оси ординат можно откладывать величину V_i.

Если пустые породы состоят из горных пород, различающихся по себестоимости их выемки, то вместо физических объемов по оси ординат нужно откладывать приведенные по себестоимости объемы. Для этого можно воспользоваться расчетной формулой (16).

Все сказанное позволяет нам сформулировать еще более простой критерий оценки

$$\mu_{з_i} = \frac{V_i}{P_i} \longrightarrow \min. \tag{20}$$

Отметим, что $\mu_з$ является по смыслу средним с начала отработки коэффициентом вскрыши [1]. На графике $V = f_з(P)$ линия, соответствующая наиболее эффективному варианту, будет занимать самое низкое положение, а $\mu_{з_i} = \operatorname{tg}\alpha_i$.

Следовательно, можно рекомендовать, в зависимости от разведанности и изменчивости данных месторождения, наличия данных по обогатимости, надежности оптовых цен и других факторов, следующие критерии оценки эффективности способов вскрытия и направления развития горных работ (в порядке возрастания сложности и точности расчетов):

$$\mu_з \longrightarrow \min;\ \mu_2 \longrightarrow \min;\ \mu_1 \longrightarrow \min;\ Э \longrightarrow \max.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Арсентьев А. И. Определение производительности и границ карьеров. Изд. 2-е. Недра, 1970.

2. Астахов А. С. Экономическая эффективность капитальных вложений в угольную промышленность. Наука, 1964.

3. Хохряков В. С. Показатели технического прогресса на карьерах СССР. Изв. вузов, «Горн. журн.», 1965, № 10.