

УДК 622.271

А.А. Дремин

**ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ОПТИМАЛЬНОГО ДИАМЕТРА КОТЛОВЫХ
ПОЛОСТЕЙ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ
ТЕХНОЛОГИИ ОБУРИВАНИЯ УСТУПОВ
НА КАРЬЕРАХ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ**

О том, что комбинированная технология обурирования уступов на карьерах железистых кварцитов является более эффективной по сравнению с другими технологиями известно из работ [1, 2].

С увеличением диаметра котлового расширения скважин возможно увеличить сетку скважин, сохраняя при этом удельный расход ВВ постоянным. С увеличением сетки скважин сократится расход шарошечных долот и парк станков для шарошечного бурения скважин, однако возрастут затраты на термическое расширение скважин. Таким образом, с увеличением диаметра котлового расширения доля себестоимости обурирования массива шарошечными станками C_w будет уменьшаться, а доля себестоимости обурирования массива, обусловленная термическим расширением скважин C_m – возрастать.

Вполне очевидно, что себестоимость отбойки руды C_{om} также будет зависеть от диаметра котлового расширения D_k .

Из чисто феноменологических рассуждений следует:

$$C_{om} = C_{об} + C_s = \left[(Z_w + Z_m) / a\epsilon \right] + \left[(Z_3 + Z_k + Z_{ВВ}) / a\epsilon \right], \quad (1)$$

где $C_{об}$ – доля себестоимости отбойки руды, обусловленная обурированием массива, руб/м³; C_s – доля себестоимости отбойки руды, обусловленная затратами на взрывание, руб/м³; Z_w – затраты на бурение 1 м скважины станком шарошечного бурения, руб/м; Z_m – затраты на термическое расширение 1 м скважины, приведенные ко всей высоте скважины, руб/м; Z_3 – затраты на зарядание 1 м скважины, руб/м; Z_k – затраты на средства взрывания (СВ) и коммутацию взрывной сети в расчете на 1 м скважины, руб/м; $Z_{ВВ}$ – стоимость ВВ в расчете на 1 м скважины, руб/м; ab – сетка скважин, м x м.

Очевидно, что функция $C_{об} = \psi(D_k)$ имеет минимум, соответствующий оптимальному диаметру котлового расширения. Для определения этого минимума необходимо установить вид функции $C_{об} = \psi(D_k)$. Функция $C_s = \psi(D_k)$ будет иметь убывающий характер, так как с увеличением диаметра скважин уменьшается их число, а следовательно будут уменьшаться и затраты на зарядание скважин и коммутацию взрывной сети.

Величина Z_w зависит от осевого усилия на шарошечное долото, частоты его вращения, диаметра долота и показа-

теля буримости горных пород, который, в свою очередь, зависит, главным образом, от прочностных свойств горных пород. Для конкретного бурового станка и конкретной породы величина $Z_w = \text{const}$.

Численное значение величины Z_w можно определить следующим образом:

$$Z_w = \frac{\mathcal{E}_6}{V_6} \quad (2)$$

где \mathcal{E}_6 - затраты на бурение скважины шарошечным станком в единицу времени, руб/с; V_6 - скорость шарошечного бурения скважин, м/с.

Эмпирическая зависимость для определения V_6 имеет вид [3]

$$V_6 = \frac{58,3 \cdot 10^{-10} P_o n_e}{\Pi_6 \cdot D_c^2} \quad (3)$$

где P_o - осевое усилие долота, Н; n_e - частота вращения долота, с^{-1} ; D_c - диаметр скважины (долота), м; Π_6 - показатель буримости породы.

Для определения величины Π_6 в работе В.В. Ржевского [3] приведена эмпирическая формула:

$$\Pi_6 = 7 \cdot 10^{-8} (\sigma_{\text{сж}} + \sigma_{\text{сдв}}), \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{сж}}$ - предел прочности породы на сжатие, Па; $\sigma_{\text{сдв}}$ - предел прочности породы на сдвиг, Па.

Подставив формулу (4) в (3), а полученный результат в формулу (2), определим зависимость затрат на шарошечное бурение 1 м скважины как функцию ее диаметра, прочностных свойств пород и режимов бурения

$$Z_w = \frac{1,2 \cdot 10^2 \mathcal{E}_6 (\sigma_{\text{сж}} + \sigma_{\text{сдв}}) D_c^2}{P_o \cdot n_e} \quad (5)$$

Затраты на термическое расширение 1 м скважины, приведенные ко всей ее высоте, можно представить в виде

$$Z_m = \frac{H_k}{H_c} Z_{\text{тк}} \quad (6)$$

где H_k - высота расширенной и заряжаемой котловой полости, м; H_c - высота скважины, м, $H_c = H_y + \Delta H$; H_y - высота уступа, м; ΔH - высота перебура, м; $Z_{\text{тк}}$ - затраты на образование 1 м котловой полости диаметром D_k , руб/м.

Отношение H_k / H_c на практике принимается равным 2/3. Численное значение величины $Z_{\text{тк}}$ можно рассчитать по формуле:

$$Z_{\text{тк}} = \mathcal{E}_{\text{тк}} / V_n \quad (7)$$

где $\mathcal{E}_{\text{тк}}$ - расходы на термическое расширение скважин в единицу времени, руб/с; V_n - скорость подъема штанги при термическом расширении скважин, м/с.

Величина V_n связана с объемной скоростью термического расширения скважин отношением

$$V_n = \frac{4V_m}{\pi(D_k^2 - D_c^2)} \quad (8)$$

где V_m - объемная скорость термического разрушения горных пород при расширении скважин, $\text{м}^3/\text{с}$.

Зависимость объемной скорости термического разрушения пород при расширении скважин, как функция диаметра котлового расширения D_k , имеет вид [1]

$$V_m = \frac{B_o}{(D_k + D_m)^{0,8} \cdot (D_k + D_m)} \times \left\{ (D_k + D_c) \left[\theta_o \arctg \sqrt{\frac{\theta_o}{T_p} - 1} - T_p \sqrt{\frac{\theta_o}{T_p} - 1} \right] - \frac{D_k - D_c}{2 \sqrt{(\theta_o / T_p) - 1}} \left[\theta_o \ln \left(\frac{\theta_o}{T_p} \right) - \theta_o + T_p \right] \right\} \quad (9)$$

где

$$B_o = 0,02415 P_r^{0,43} \eta \lambda_m \left[\frac{2G_m R (T_c - T_p)}{\pi v_m P} \right]^{0,8} \times \frac{\pi \delta a_n}{\lambda_n T_p};$$

D_m - диаметр горелки терморасширителя, м; θ_o - температура газовой струи горелки в центре пятна торможения, °С; T_p - температура поверхности породы в момент разрушения ее поверхностного слоя, °С.

$$T_p = 2\sigma_{сж} (1 - \mu) / (\beta E), \text{ } ^\circ\text{C}$$

где $\sigma_{сж}$ - предел прочности породы на одноосное сжатие, Па; μ - коэффициент Пуассона; β - коэффициент линейного теплового расширения породы, К⁻¹; E - модуль упругости породы, Па; P_r - критерий Прандтля (см. таблицу); η - коэффициент,

$$\eta = \frac{\left[\left(\frac{T_c + T_p}{2} \right) + 273 \right]}{\left[\frac{T_p}{2} + 273 \right]};$$

T_c - температура газовой струи на срезе сопла горелки - терморасширителя (для горелок с водяным охлаждением $T_c \sim 1500$ °С, для горелок с воздушным охлаждением $T_c \sim 1600$ °С; λ_m - теплопроводность газового теплоносителя, Вт/(мК) (значения λ_m приведены в таблице); G_m - суммарный расход топлива,

кг/с, $G_m = G_o + G_g$; G_o - расход окислителя, кг/с; G_g - расход горючего, кг/с; R - газовая постоянная для поддувков сгорания, Дж/(кгК), (значения R приведены в таблице); v_m - кинематическая вязкость теплоносителя, м²/с (см. таблицу); P - давление в скважине, Па, $P = 1,1 \cdot 10^5$ Па; δ - параметр распределения теплоносителя по высоте разрушения породы в скважине при ее расширении, м, $\delta = 0,25 \dots 0,3$ м для горелом с водяным охлаждением и $\delta = 0,4 \dots 0,45$ м для горелок с воздушным охлаждением; a_n - температуропроводность породы м²/с; λ_n - теплопроводность породы, Вт/мК).

Подставив формулу (9) в (8), а результат в формулу (7), а затем в (6) и приняв отношение $H_k / H_c = 2/3$, получим зависимость затрат на термическое расширение 1 м скважины, приведенных ко всей высоте скважины, как функцию диаметра котловой полости, свойств горной породы и термодинамических параметров горелки-терморасширителя (формула 10).

Функция $Z_3 = \varphi(D_k)$ имеет вид

$$Z_3 = \frac{\pi \mathcal{E}_3 D_k^2}{6V_3} \quad (11)$$

где \mathcal{E}_3 - расходы на зарядание скважины зарядной машиной в единицу времени, руб./с; V_3 - объемная скорость зарядания скважин, м³/с.

Величину Z_k , входящую в выражение (1) можно определить из следующей

$$Z_m = \frac{\pi \mathcal{E}_{mk} (D_k^2 - D_c^2) (D_k + D_m)^{0,8} (D_k - D_m)}{\left\{ 6B_o (D_k + D_c) \left[\theta_o \arctg \sqrt{\frac{\theta_o}{T_p} - 1} - T_p \sqrt{\frac{\theta_o}{T_p} - 1} \right] - \frac{D_k - D_c}{2 \sqrt{\frac{\theta_o}{T_p} - 1}} \left[\theta_o \ln \left(\frac{\theta_o}{T_p} \right) - \theta_o + T_p \right] \right\}} \quad (10)$$

$[T_c + T_p / 2] \cdot C$	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
P_r	0,64	0,63	0,62	0,61	0,6	0,59	0,58	0,57	0,56
$\lambda_m \cdot 10^2$, Вт/(мК)	5,7	6,56	7,42	8,27	9,15	10	10,9	11,75	12,62
R , Дж/(кгК)	309	311	312	313	315	310	305	299	290
$\nu_m \cdot 10^6$, м ² /с	60,38	76,3	93,61	112,1	131,8	152,5	174,3	197,1	221

очевидной формулы:

$$\mathcal{Z}_k = \frac{\mathcal{Z}_{к.о.}}{H_c} \cdot \frac{D_c^2}{D_k^2} \quad (12)$$

где $\mathcal{Z}_{к.о.}$ - затраты на средства инициирования (СИ) и коммутацию одной скважины, руб.

Значение величины $\mathcal{Z}_{ВВ}$, входящей в выражение (1), можно определить из следующей очевидной формулы:

$$\mathcal{Z}_{ВВ} = \frac{H_k}{H_c} \cdot \frac{\pi D_k^2}{4} \rho \mathcal{C}_{ВВ} = \frac{\pi D_k^2 \rho \mathcal{C}_{ВВ}}{6} \quad (13)$$

где ρ - плотность ВВ в заряженной скважине, кг/м³; $\mathcal{C}_{ВВ}$ - стоимость ВВ, руб/кг.

С другой стороны значение величины $\mathcal{Z}_{ВВ}$ можно определить из другой очевидной формулы, а именно:

$$\mathcal{Z}_{ВВ} = qab\mathcal{C}_{ВВ}, \quad (14)$$

где q - удельный расход ВВ, кг/м³, ab - сетка скважин, м x м.

Приравнявая правые части выраже-

ний (13) и (14) получим зависимость сетки скважин от диаметра котлового расширения:

$$ab = \frac{\pi D_k^2 \rho}{6q} \quad (15)$$

Подставляя величины, входящие в формулу (1) соответственно из формул (5), (10), (11), (12), (13) окончательно получим зависимость себестоимости отбойки руды как функцию диаметра котлового расширения при комбинированной технологии шарошечного бурения и термического расширения взрывных скважин на карьерах

Как видно из формулы (16), влияние диаметра котлового расширения на себестоимость взрывной отбойки сказывается через первое, второе и четвертое слагаемые. Третье и пятое слагаемые не зависят от D_k , т.е. затраты на зарядание и стоимость ВВ, приходящиеся на 1 м скважины не зависят от D_k и сетки скважин.

$$\begin{aligned} C_{от} = & \frac{7,2 \cdot 10^2 \mathcal{E}_6 D_c^2 q (\sigma_{сж} + \sigma_{оде})}{\pi P_o n_g D_k^2 \rho} + \\ & + \frac{\mathcal{E}_m q (D_k^2 - D_c^2) (D_k + D_m)^{0,8} (D_k - D_m)}{\left\{ (D_k + D_c) \left[\theta_o \arctg \sqrt{\frac{\theta_o}{T_p} - 1} - T_p \sqrt{\frac{\theta_o}{T_p} - 1} \right] - \frac{D_k - D_c}{2 \sqrt{\frac{\theta_o}{T_p} - 1}} \left[\theta_o \ln \left(\frac{\theta_o}{T_p} \right) - \theta_o + T_p \right] \right\}} + \\ & + \frac{\mathcal{E}_3 q}{V_3 \rho} + \frac{6 \cdot \mathcal{Z}_{к.о.} D_c \cdot q}{\pi H_c \rho D_k^4} + q \mathcal{C}_{ВВ} \end{aligned} \quad (16)$$

$$C_{от} = \frac{A}{D_k^2} + \frac{B(D_k^2 - D_c^2)(D_k + D_m)^{0.8}(D_k - D_m)}{D_k^2 [K(D_k - D_c) - L(D_k - D_m)]} + \frac{\mathcal{E}_3 q}{V_3 q} + \frac{M}{D_k^4} + q \Pi_{ВВ} \quad (17)$$

$$-\frac{2A}{D_k^2} + \frac{B(D_k^2 - D_c^2)(D_k + D_m)^{0.8}(D_k + D_m) \left\{ \left[2 \frac{D_k}{D_k^2 - D_c^2} + \frac{0,8}{D_k + D_m} + \frac{1}{D_k - D_m} \right] \right\}}{D_k^4 [D_k(K - L) + D_c(K + L)]^2} \times$$

$$\times \frac{[D_k^3(K - L) + D_k^2 D_c(K + L)] - [3D_k^3(K - L) + 2D_k^2 D_c(K + L)]}{1} - \frac{4M}{D_k^5} = 0 \quad (18)$$

Обозначим в формуле (16) в первом слагаемом:

$$A = \frac{7,2 \cdot 10^2 \mathcal{E}_6 D_c q (\sigma_{сж} + \sigma_{сдв})}{\pi P_o n_s \rho}$$

в втором слагаемом:

$$B = \frac{\mathcal{E}_m q}{B_o \rho};$$

$$K = \left[\theta_o \arctg \sqrt{\frac{\theta_o}{T_p} - 1} - T_p \sqrt{\frac{\theta_o}{T_p} - 1} \right];$$

$$L = \frac{\theta_o \ln \left(\frac{\theta_o}{T_p} \right) - \theta_o + T_p}{2 \sqrt{\frac{\theta_o}{T_p} - 1}}$$

в четвертом слагаемом:

$$M = \frac{6 \cdot \mathcal{E}_{к.о.} D_c^2 q}{\pi H_c \rho}$$

Приведенные в обозначениях А, В, К, L, М величины не зависят от диаметра коллового расширения.

С учетом вышеприведенных обозначений выражение (16) примет вид:

Взяв производную от правой части выражения (17) по D_k и приравняв ее к нулю, получим:

Решая уравнение (18) относительно D_k , получим значение диаметра котлового расширения скважин, при котором себестоимость отбойки руды на карьерах с применением комбинированной технологии шарошечного бурения и термического расширения скважин будет минимальной.

В соответствии с (18) составлена программа для расчета оптимального значения D_k на ЭВМ. Ее использование позволяет оптимизировать буровые работы при комбинированной технологии шарошечного бурения скважин и их термического расширения.

Определив оптимальное значение величины $D_{к.оп}$ из формулы (18), можно рассчитать по формулам (5) и (6) параметры сетки скважин при заданном удельном расходе ВВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончаров С.А. Термическое расширение взрывных скважин на карьерах. – М.: МГГУ, 2002, 137 с.
2. Антоненко Л.К., Гончаров С.А. Дмитриев А.П. и др. Разработка и внедрение способа, техники и технологии термического расширения скважин на карьерах. – М.: МГГУ, Рукопись (материалы Госпремии), 1996, 70 с.
3. Ржевский В.В. Процессы открытых горных работ. – М.: Недра, 1978, 544 с.

Коротко об авторах

Дремин А.А. – аспирант, Московский государственный горный университет.