

УДК 622.831.32

Д.В.СИДОРОВ, канд. техн. наук, доцент, *sidorov@spmi.ru*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

D.V.SIDOROV, PhD in eng. sc., associate professor, *sidorov@spmi.ru*

National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ РУДЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ УДАРООПАСНОСТИ РУДНОЙ ЗАЛЕЖИ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ ПРИ ВЕДЕНИИ ОЧИСТНЫХ РАБОТ КАМЕРНО-СТОЛБОВОЙ СИСТЕМОЙ РАЗРАБОТКИ

Приведена методика расчета параметров запредельного деформирования руды (модуля спада) с учетом широкого диапазона горно-геологических и горно-технических факторов. Приведены графические зависимости модулей спада основных разновидностей бокситовых руд от размеров выработанных пространств, глубины разработки и мощности рудной залежи при применении камерно-столбовой системой разработки с оставлением податливых между-камерных целиков в условиях глубоких горизонтов ОАО «Севуралбокситруда».

Ключевые слова: методика, модуль спада, камерно-столбовая система разработки, удароопасность, рудные месторождения.

ANALYTICAL METHOD FOR DETERMINING THE PARAMETERS TRANSMARGINAL DEFORMATION ORE FOR BUMP HAZARD ASSESSMENT FOR ORE DEPOSITS AT GREAT DEPTHS WHEN USING ROOM-AND-PILLAR SYSTEM

The analitic method for calculating the parameters of the transmarginal deformation ore with the wide range of geological and mining- technical factors. Shows a graph of transmarginal deformation ore main varieties of bauxite ore from excavation size, depth and capacity of the ore deposit in the application for room-and-pillar system with compliant interchamber pillars on deep horizons of JSC «Sevuralboksitruda».

Key words: analitic method, transmarginal deformation ore, room-and-pillar system, a bump hazard, ore deposits.

Известное условие удароопасности рудной залежи*, с учетом размеров выработанного пространства, формируемого в результате ведения очистных работ, можно представить в виде

* Петухов И.М. Расчетные методы в механике горных ударов и выбросов: Справочное пособие / И.М.Петухов, А.М.Линьков, В.С.Сидоров. М., 1992. 236 с.

Petukhov I.M., Linkov A.M., Sidorov V.S. Computational methods in mechanics of rock bursts and releases: Handbook. Moscow, 1992. 236 p.

$$\eta_{уд} = \frac{\sqrt{\pi}}{1,4} \frac{0,01\gamma H}{\sigma_{сж} \xi} \sqrt{\frac{a}{m}} > 1, \quad (1)$$

где $\eta_{уд}$ – показатель удароопасности; γ – плотность покрывающих пород, $\text{т}/\text{м}^3$; H – глубина горных работ, м; $\sigma_{сж}$ – предел прочности руды на одноосное сжатие, МПа; $\xi = f(M_p/E_n)$ – известная функция, принимаемая в соответствии с данными таблицы; M_p – модуль спада руды на запредельной диаграмме деформирования, МПа; E_n –

средневзвешенный модуль упругости вмещающих пород, МПа; a – ширина выработанного пространства, м; m – мощность рудной залежи, м.

Значения параметра ξ

M_p/E_p	ξ	M_p/E_p	ξ	M_p/E_p	ξ
0,03	32,0	0,28	2,80	0,81	1,20
0,07	11,2	0,39	2,20	1,00	1,00
0,13	6,10	0,51	1,70	1,45	0,80
0,20	4,00	0,65	1,40	2,30	0,50

Анализ структуры выражения (1) показывает, что для его решения необходимо получение характеристик запредельного деформирования руды (модуля спада) в лабораторных или шахтных условиях, что связано со значительными, зачастую непреодолимыми трудностями из-за необходимости комплексного учета влияния широкого диапазона факторов, участвующих в нагружении краевой части рудной залежи (рис. 1).

Расчетная модель напряженно-деформированного состояния рудной залежи и вмещающих пород принимается при следующих основных геомеханических предпосылках. Вмещающие породы предполагаются сплошной однородной, изотропной, линейно-упругой средой. Для глубоких горизонтов СУБРа, превышающих 1000 м, междукамерные целики в расчетной схеме не учитываются, поскольку теряют несущую способность и находятся в выработанном пространстве в режиме остаточной прочности. Краевая часть рудной залежи находится в предельном состоянии. В максимуме опорного давления рудной залежи принимаются условия $M_p = E_p$ и $\sigma_{\text{пр}} = \sigma_{\text{max}}$ (здесь E_p – модуль упругости руды, МПа; $\sigma_{\text{пр}}$ – прочность руды на расстоянии, соответствующем максимуму опорного давления σ_{max} , МПа). Взаимосвязь принятых условий можно представить в виде функциональной зависимости $M_p/E_p = f(\sigma_{\text{пр}}/\sigma_{\text{max}})$, при линейной аппроксимации которой получим уравнение

$$\frac{M_p}{E_p} = 1 - \frac{\sigma_{\text{пр}}}{\sigma_{\text{max}}}. \quad (2)$$

Принимая прочность руды под максимумом опорного давления $\sigma_{\text{пр}} = 1,4 \frac{X_1}{m} \sigma_{\text{сж}}$ (здесь X_1 – расстояние от краевой части рудной залежи до точки максимума опорного давления, м), получим выражение для модуля спада

$$M_p = \left(1 - 1,4 \frac{X_1}{m} \frac{\sigma_{\text{сж}}}{\sigma_{\text{max}}} \right) E_p. \quad (3)$$

Максимальное напряжение определяется из решения Прандтля:

$$\sigma_{\text{max}} = \tau' \frac{2X_1}{m}, \quad (4)$$

где τ' – среднее значение касательных напряжений на контакте между рудной залежью и вмещающими породами в интервале $[0, \sigma_{\text{max}}]$, МПа,

$$\tau' = 0,5 (\tau_{\text{max}} + 0,5\sigma_{\text{сж}}); \quad (5)$$

τ_{max} – касательные напряжения, снимаемые с паспорта контактной прочности Кулона – Мора при вертикальном напряжении, равном σ_{max} , МПа.

С учетом (4) и (5), выражение (3) примет вид

$$M_p = \left(1 - \frac{1,4\sigma_{\text{сж}}}{0,5\sigma_{\text{сж}} + \tau_{\text{max}}} \right) E_p. \quad (6)$$

Уравнение паспорта контактной прочности Кулона – Мора, принимаемое в виде отрезка наклонной прямой, имеет вид

$$\tau_{\text{max}} = 0,5\sigma_{\text{сж}} + \operatorname{tg}\rho\sigma_{\text{max}}, \quad (7)$$

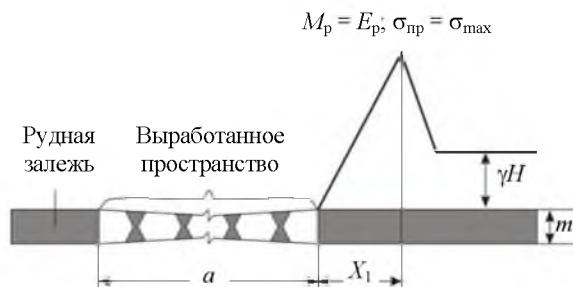


Рис.1. Основная расчетная схема нагружения краевой части рудной залежи

где ρ – угол внутреннего трения материала руды, град.

Подставляя (7) в (6), получим следующее выражение для модуля спада

$$M_p = \left(1 - \frac{1,4\sigma_{cж}}{\sigma_{cж} + \operatorname{tg}\rho\sigma_{max}} \right) E_p. \quad (8)$$

Значения углов внутреннего трения для типичных разновидностей бокситовых руд СУБРа, следующие:

Бокситы плотные	ρ , град
Красные маркие,	33
Красные немаркие	34
Пестроцветные	35

С учетом (5) и (7) выражение (4) можно записать в виде

$$\sigma_{max} = (\sigma_{cж} + \operatorname{tg}\rho\sigma_{max}) \frac{X_1}{m}. \quad (9)$$

Преобразуем выражение (9) относительно параметра σ_{max} :

$$\sigma_{max} = \left(\frac{X_1}{m - \operatorname{tg}\rho X_1} \right) \sigma_{cж}. \quad (10)$$

С учетом (10) из выражения (8) получим

$$M_p = \left(\frac{X_1}{m} \operatorname{tg}\rho - 0,3 \right) 1,4 E_p.$$

Анализ исследований, выполненных учеными ВНИМИ, показывает, что расстояние до точки максимума опорного давления допустимо определять по формуле

$$X_1 = 0,7 \frac{a}{D^{\frac{2}{3}} + \beta},$$

где D – градиент нарастания опорного давления в краевой части рудной залежи

$$D = \frac{1,4\sigma_{cж}}{\sigma} \frac{a}{m}; \quad \sigma \text{ – нормальные к напла-} \quad \text{стованию напряжения, формирующие опор-}$$

ные нагрузки в рудной залежи, МПа; β – характеристика степени влияния естественной и техногенной (искусственной) податливости на напряженно-деформированное состояние краевой части рудной залежи.

Нормальные к напластованию напряжения

$$\sigma = \gamma H (\cos^2 \alpha + \lambda_t \sin^2 \alpha),$$

где α – угол падения рудной залежи, град; $\lambda_t = \sigma_t / \sigma_b$ – отношение горизонтальных (σ_t) к вертикальным (σ_b) напряжениям нетронутого массива.

При влиянии на напряженно-деформированное состояние краевой части рудной залежи только естественной податливости*

$$\beta = \frac{\pi}{2(1 - v_n)} \frac{m}{0,7a} \times \left(\frac{(1 + v_p)(1 - 2v_p)}{1 + v_n} \frac{E_n}{E_p} - (1 - 2v_n) \right), \quad (11)$$

где v_n и v_p – коэффициенты Пуассона соответственно вмещающих пород и руды.

Для дополнительного учета искусственной податливости рудной залежи, например в случае разгрузки рудной залежи скважинами большого диаметра, рассмотрим тождественное равенство

$$W_n + \Delta_{ш} = W_0, \quad (12)$$

где W_n – вертикальное перемещение (обжатие) краевой части рудной залежи с учетом естественной податливости, м; $\Delta_{ш}$ – толщина разгрузочной щели в зависимости от способа разделки щели, м; W_0 – вертикальное перемещение (обжатие) краевой части рудной залежи с учетом взаимного влияния естественной и техногенной податливости, м.

Толщина разгрузочной щели (по данным ОАО СУБР) следующая ($d_{скв}$ – диаметр скважин, м):

Расположение скважин в щели	$\Delta_{ш}, \text{ м}$
Сплошное	$d_{скв}$
Через один диаметр	$d_{скв} / 2$
Через два диаметра	$d_{скв} / 3$

* Защитные пласти / И.М.Петухов, А.М.Линьков, И.А.Фельдман, В.П.Кузнецов, В.В.Тетеревенков. Л., 1972. 424 с.

Petukhov I.M., Linkov A.M., Feldman I.A., Kuznetsov V.P., Teterevenkov V.V. Protective layers. Leningrad, 1972. 424 p.

Влияние естественной податливости, т.е. степень сжатия краевой части рудной залежи,

$$W_{\text{п}} = \frac{\sigma_{\text{max}}}{E_p} m.$$

С учетом (10) получим

$$W_{\text{u}} = \frac{X_1}{1 - \operatorname{tg}\rho \frac{X_1}{m}} \frac{\sigma_{\text{сж}}}{E_p}. \quad (13)$$

Вертикальное перемещение (обжатие) краевой части рудной залежи с учетом взаимного влияния естественной и техногенной податливости можно представить в виде

$$W_0 = \frac{X_1}{1 - \operatorname{tg}\rho \frac{X_1}{m}} \frac{\sigma_{\text{сж}}}{E'_p}, \quad (14)$$

где E'_p – модуль упругости руды, учитывающий естественную и искусственную податливость, МПа.

Преобразуем выражение (12) с учетом (13) и (14) относительно E'_p :

$$E'_p = \frac{E_p}{1 + \left(1 - \operatorname{tg}\rho \frac{X_1}{m}\right) \frac{\Delta_{\text{ш}}}{X_1} \frac{E_p}{\sigma_{\text{сж}}} }.$$

Подставляя в (11) вместо E_p выражение для E'_p получим формулу для параметра β с совокупным учетом взаимного влияния естественной и техногенной (искусственной) податливости:

$$\hat{\beta} = \frac{\pi}{2(1-\nu_{\text{п}})} \frac{m}{0,7a} \left(\frac{(1+\nu_p)(1-2\nu_p)}{1+\nu_{\text{п}}} \times \right. \\ \left. \times \left(1 + \left(1 - \operatorname{tg}\rho \frac{X_1}{m}\right) \frac{\Delta_{\text{ш}}}{X_1} \frac{E_p}{\sigma_{\text{сж}}} \right) \frac{E_{\text{п}}}{E_p} - (1-2\nu_{\text{п}}) \right).$$

В случае, когда кровля рудного тела представлена прослойями пластичных сланцев, в качестве параметра, характеризующего модуль упругости материала руды, необходимо использовать выражение

$$E_{\text{п. комб}} = \frac{E_{\text{сл}} E_p (h_{\text{сл}} + m)}{E_p h_{\text{сл}} + E_{\text{сл}} m},$$

где $E_{\text{сл}}$ – модуль упругости сланцев, МПа; $h_{\text{сл}}$ – мощность сланцев, м.

Для расчета модуля спада и показателя удароопасности принимались следующие горно-геологические и горно-технические данные: $\gamma = 2,54 \text{ т}/\text{м}^2$; $H = 1000 \text{ м}$; $E_{\text{п}} = 30000 \text{ МПа}$; $a \in [20; 160] \text{ м}$; $m = 6 \text{ м}$; $\alpha = 30^\circ$; $\lambda_{\text{т}} = 1,4$; $\nu_{\text{п}} = 0,30$; $\nu_p = 0,28$. Для красных марких бокситов (БКМ) $\sigma_{\text{сж}} = 20 \text{ МПа}$; $E_p = 6000 \text{ МПа}$; $\rho = 33^\circ$; для красных немарких бокситов (БКНМ) $\sigma_{\text{сж}} = 40 \text{ МПа}$; $E_p = 18000 \text{ МПа}$; $\rho = 34^\circ$; для пестроцветных бокситов (БП) $\sigma_{\text{сж}} = 80 \text{ МПа}$; $E_p = 65000 \text{ МПа}$; $\rho = 35^\circ$.

Полученные зависимости модуля спада и показателя удароопасности от размеров выработанных пространств и разновидностей бокситовых руд приведены на [рис.2](#).

Из графиков видно, что модуль спада изменяется по линейному закону при увеличении выработанного пространства для всех разновидностей бокситовых руд (рис.2, а). Наибольший градиент нарастания модуля спада наблюдается у прочных разновидностей бокситовых руд, что также подтверждается данными лабораторных испытаний физико-механических свойств рудных образцов. Результаты оценки удароопасности (рис.2, б) показывают, что нарастание удароопасности при отработке руд средней прочности (красные немаркие бокситы) и прочных руд (пестроцветные бокситы) пропорционально увеличению размера выработанного пространства. В то же время увеличение интенсивности проявления удароопасности при отработке мягких разновидностей бокситовых руд начинает проявляться при размерах выработанного пространства, превышающих 80 м, что обусловлено значительной естественной податливостью красных марких бокситов и их слабой чувствительностью к нарастанию опорного давления при малых размерах выработанного пространства.

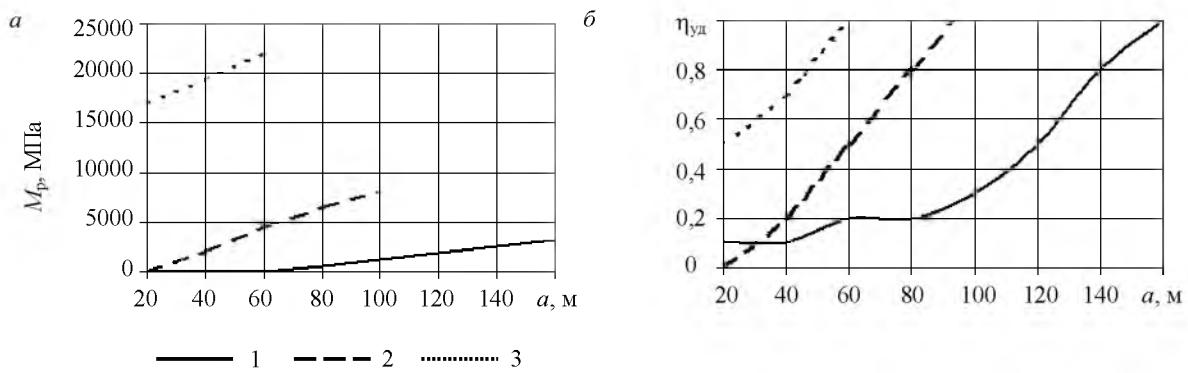


Рис.2. Закономерности изменения модуля спада (а) и показателя удароопасности (б)
1, 2, 3 – соответственно для БКМ, БКНМ и БП

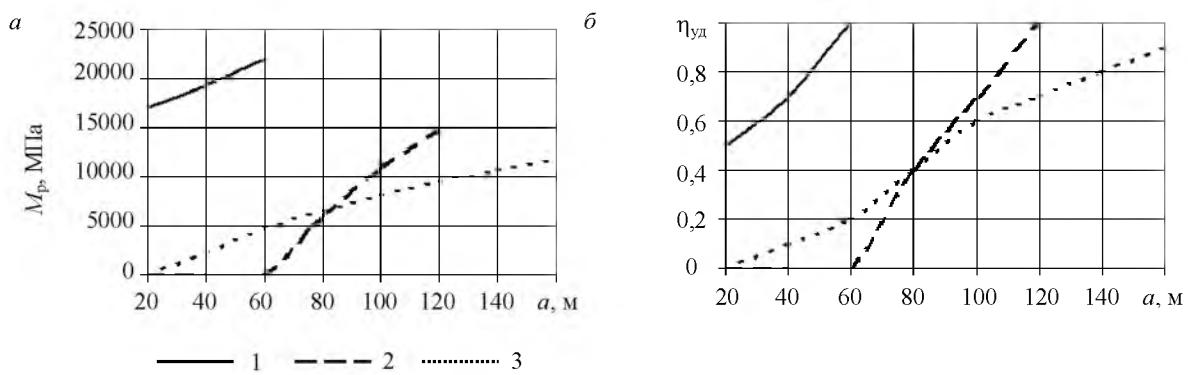


Рис.3. Закономерности изменения модуля спада (а) и показателя удароопасности (б) при отработке пестроцветных бокситовых руд с учетом податливости и наличия прослоев
1 и 2 – с учетом естественной и технической податливости соответственно; 3 – с учетом наличия прослоев сланца

Потеря устойчивости обнажения краевой части рудной залежи наблюдается для условий отработки красных марких и немарких бокситов при ширине выработанного пространства более 160 и 90 м соответственно, при отработке пестроцветных бокситов более 60 м. При этом критические значения отношений модулей спада к модулям упругости руд разной прочности существенно отличаются: $M_p = 0,53E_p$ при отработке красных марких бокситов, $M_p = 0,42E_p$ при отработке красных немарких бокситов и $M_p = 0,34E_p$ при отработке пестроцветных бокситов, что свидетельствует о различном резерве запаса их прочности.

Для исследования зависимости модуля спада и показателя удароопасности от тех-

нологенного зазора (техногенной податливости), а также наличия пластичных прослоев сланцев в кровле рудной залежи были приняты условия отработки наиболее ударопасного пестроцветного боксита при $\Delta_{ш} = 0,035$ м, $E_{сл} = 4000$ МПа; $h_{сл} = 0,5$ м (рис.3).

Анализ показывает, что применение скважинной разгрузки краевой части рудной залежи от горного давления, а также наличие в кровле рудной залежи мягких прослоев сланцев, приводит к нелинейному характеру изменения модуля спада при увеличении выработанного пространства (рис.3, а). Наличие пластичных сланцев в кровле залежи увеличивает безопасный размер выработанного пространства более чем в 2,5 раза за счет дополнительного роста естественной податливости залежи

(рис.3, б). Применение скважинной разгрузки позволяет увеличить безопасный размер выработанного пространства в 2 раза (рис.3, б), что свидетельствует о ее значительной эффективности.

Таким образом, предлагаемая методика позволяет расчетным путем определять па-

раметры запредельного деформирования руды (модуля спада) в краевой части залежи с учетом широкого диапазона горно-геологических и горно-технических факторов для дальнейшей оценки безопасных размеров выработанных пространств при ведении очистной выемки руды.