

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, т/м³; H – глубина горных работ, м; $\sigma_{сж}$ – предел прочности руды на одноосное сжатие, МПа; $\xi = f(M_p/E_{II})$ – известная функция, принимаемая в соответствии с данными таблицы; M_p – модуль спада руды на запредельной диаграмме деформирования, МПа; E_{II} –

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 предельного 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 предположениях. Вмещающие породы предполагаются сплошной однородной, изотропной, линейно-упругой средой. Для глубоких горизонтов СУБРа, превышающих 1000 м, междукammerные 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 $\sigma_{пр} = \sigma_{max}$ (здесь E_p – модуль упругости руды, МПа; $\sigma_{пр}$ – прочность руды на расстоянии, соответствующем максимуму опорного давления σ_{max} , МПа). Взаимосвязь принятых условий можно представить в виде функциональной зависимости $M_p/E_p = f(\sigma_{пр}/\sigma_{max})$, при линейной аппроксимации которой получим уравнение

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

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

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

Максимальное напряжение определяется из решения Прандтля:

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

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

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

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

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

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

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

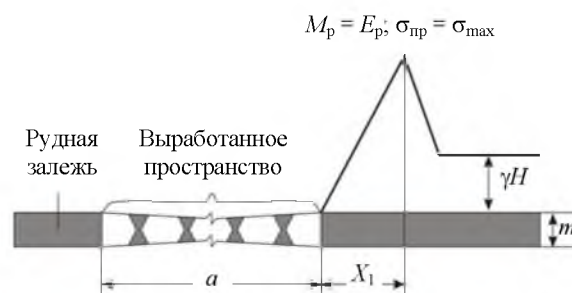


Рис.1. Основная расчетная схема нагружения краевой части рудной залежи

где ρ – угол внутреннего трения материала руды, град.

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

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

Значения углов внутреннего трения для 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

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

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

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

С учетом (10) из выражения (8) получим

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

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

$D = \frac{1,4\sigma_{сж}}{\sigma} \frac{a}{m}$; σ – нормальные к напла-

стованию напряжения, формирующие опорные 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; $\lambda_T = \sigma_r / \sigma_b$ – отношение горизонтальных (σ_r) к вертикальным (σ_b) напряжениям нетронутого массива.

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

$$\beta = \frac{\pi}{2(1 - \nu_{\Pi})} \frac{m}{0,7a} \times \left(\frac{(1 + \nu_p)(1 - 2\nu_p)}{1 + \nu_{\Pi}} \frac{E_{\Pi}}{E_p} - (1 - 2\nu_{\Pi}) \right), \quad (11)$$

где ν_{Π} и ν_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

$$W_{\Pi} + \Delta_{щ} = W_0, \quad (12)$$

где W_{Π} – вертикальное перемещение (обжатие) краевой части рудной залежи с учетом естественной податливости, м; $\Delta_{щ}$ – 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	$\Delta_{щ}$, м
Сплошное	$d_{скв}$
Через один диаметр	$d_{скв} / 2$
Через два диаметра	$d_{скв} / 3$

* Защитные пласты / 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., Teterenkov V.V. Protective layers. Leningrad, 1972. 424 p.

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

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

С учетом (10) получим

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

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:

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

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

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

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: $\gamma = 2,54 \text{ т/м}^2$; $H = 1000 \text{ м}$; $E_{\Pi} = 30000 \text{ МПа}$; $a \in [20; 160] \text{ м}$; $m = 6 \text{ м}$; $\alpha = 30^\circ$; $\lambda_T = 1,4$; $\nu_{\Pi} = 0,30$; $\nu_p = 0,28$. Для красных марких бокситов (БKM) $\sigma_{\text{сж}} = 20 \text{ МПа}$; $E_p = 6000 \text{ МПа}$; $\rho = 33^\circ$; для красных немарких бокситов (БKHM) $\sigma_{\text{сж}} = 40 \text{ МПа}$; $E_p = 18000 \text{ МПа}$; $\rho = 34^\circ$; 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.

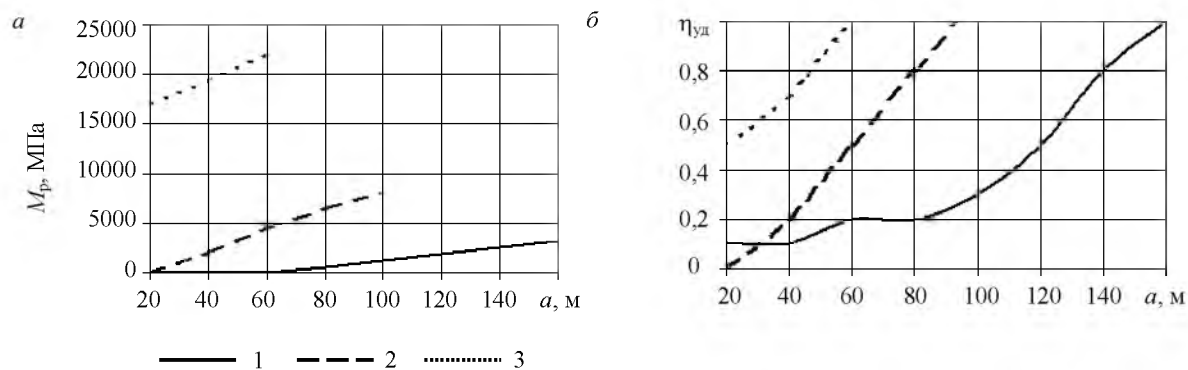


Рис.2. Закономерности изменения модуля спада (а) и показателя удароопасности (б)

1, 2, 3 – соответственно для БКМ, БКНМ и БП

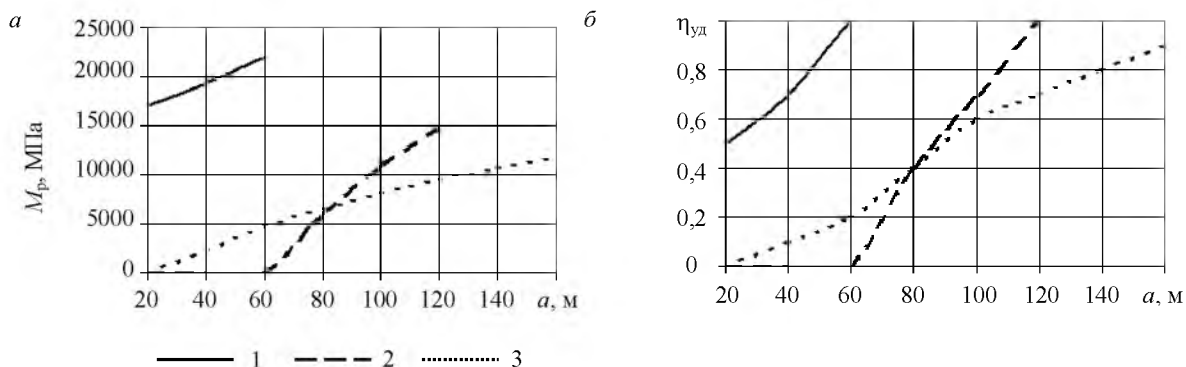


Рис.3. Закономерности изменения модуля спада (а) и показателя удароопасности (б) при отработке пестроцветных бокситовых руд с учетом податливости и наличия прослоев

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-

ногенного зазора (техногенной податливости), а также наличия пластичных прослоев сланцев в кровле рудной залежи были приняты условия отработки наиболее удароопасного пестроцветного боксита при $\Delta_{ц} = 0,035$ 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.