

УДК 622.831.325:550:34

ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКОЙ ГЛУБИНЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПО УСЛОВИЮ УДАРООПАСНОСТИ

В.Н.ТЮПИН

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

При разработке полезных ископаемых подземным способом на определенной глубине возникают динамические проявления горного давления, что существенно снижает безопасность при проведении горных работ. Нормативные документы предписывают на стадии изысканий и проектирования устанавливать критическую глубину отнесения месторождения к склонным по горным ударам. В настоящее время существует ряд, в основном инструментальных, методов определения склонности массивов горных пород к горным ударам и методов, основанных на определении физико-технических свойств и напряженно-деформированного состояния массивов горных пород.

В статье предлагается теоретический метод определения критической глубины отнесения месторождения к склонным по горным ударам. Получена формула для определения критической глубины по условию удароопасности. Проведен математический анализ влияния входящих в формулу физико-технических параметров на критическую глубину. Обоснована ее физико-математическая правомерность. Проведены численные расчеты критической глубины для 17 разрабатываемых месторождений по упрощенной формуле. Проведено сравнение расчетной и фактической критической глубины.

Установлено, что разброс фактической и расчетной критической глубины объясняется отсутствием фактических данных по значению коэффициента трения и параметрам трещиноватости горного массива в упрощенной формуле. Упрощенную формулу расчета можно использовать для оценки критической глубины месторождения на стадии изысканий и проектирования.

Более точные результаты могут быть получены при наличии фактических данных о параметрах трещиноватости, коэффициентов трения и концентрации напряжений вблизи выработанного пространства.

Ключевые слова: удароопасность месторождения; изыскания и проектирование; критическая глубина; физико-технические свойства пород; формула определения глубины; численные расчеты

Как цитировать эту статью: Тюпин В.Н. Оценка критической глубины месторождений по условию удароопасности // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 167-171. DOI: 10.31897/PMI.2019.2.167

Актуальность и изученность проблемы. При разработке месторождений полезных ископаемых подземным способом с понижением горных работ, как правило, возникают проблемы удароопасности горного массива. Нормативные документы* предписывают, что склонность к горным ударам и глубину отнесения месторождения необходимо устанавливать на стадии изысканий и проектирования [1].

Анализ отечественной и зарубежной технической литературы [1-8, 12-17] показывает, что склонность массивов горных пород к горным ударам определяется упругими и прочностными параметрами горных пород, параметрами микротрещиноватости пород, параметрами естественной трещиноватости (размер отдельности, раскрытия трещин, количество систем трещин, угол наклона к обнажению), параметрами тектонических разломов и их расположением. Склонность массива к горным ударам также обусловлена величиной гравитационного горного давления и напряжением, вызванным движением литосферных плит Земли [8]. Кроме того, при образовании выработанного пространства происходит перераспределение естественного напряженного состояния с существенным повышением его вблизи открытых поверхностей горного массива. Помимо этого, при образовании полостей в горном массиве используются взрывные работы, которые приводят к образованию вблизи обнажения зоны заколов и зоны взрывных остаточных напряжений [10].

Важным параметром месторождения, опасного по горным ударам, является критическая глубина, т.е. глубина от земной поверхности, с которой при производстве горных работ возникают горные удары, или установлена категория «Опасно», что соответствует напряженному состоянию массива в приконтурной части выработки, при котором может произойти горный удар.

Целью работы является теоретическое определение критической глубины месторождения, с которой может произойти горный удар при проходке одиночной выработки.

* Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Приказ Ростехнадзора № 576. 02.12.2013 // URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_1616871



Первичная проходка одиночных (или параллельных) выработок, как правило, осуществляется при горно-разведочных работах. При этом следует отметить, что при большей изрезанности массива горных пород критическую глубину необходимо уменьшать.

Теоретическое определение и численный расчет критической глубины массива по условию удароопасности. В работе [10] на основе закона сохранения энергии получена теоретическая формула расчета радиуса зоны заколов при буровзрывной проходке одиночной выработки в трещиноватом напряженном горном массиве. Формула получена на основе экспериментально доказанного механизма действия взрыва группы зарядов взрывных веществ (ВВ) в напряженном трещиноватом массиве горных пород, который состоит из двух временных стадий.

I стадия. Взрыв зарядов ВВ формирует волны напряжений в отдельностях, где размещены заряды, что обеспечивает разрушение отдельностей радиальными трещинами. Далее под действием квазистатического давления продуктов детонации (ПД) разрушенные отдельности начинают смещаться в радиальном направлении от взрывааемых зарядов ВВ, что сопровождается деформациями и трением между гранями удаленных отдельностей, а также их упругими деформациями. При этом величина деформаций и напряжений в отдельностях с удалением от зарядов ВВ снижается, т.е. напряженный массив в этой стадии можно представить в виде неравномерно сжатой пружины с максимальным сжатием вблизи зарядов и снижением сжатия на расстоянии.

II стадия. После падения давления в зарядных полостях реакция упруго деформированных (максимально напряженных взрывом) отдельностей в совокупности с горным давлением приводит к сдвигению массива в сторону выработанного пространства с образованием искусственных или раскрытием естественных трещин примерно параллельных контуру выработки, т.е. образуется зона заколов.

Расстояние от контура обнажения до дальней границы зоны заколов определяется из следующего условия: энергия упругой реакции массива, накопленной под действием последовательного взрывания шпуров от центра горной выработки к периферии и горного давления, равна затратам энергии на преодоление сил трения между отдельностями массива в приконтурной зоне выработки:

$$R_{03} = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \frac{D\rho_b d_3 c \left(1 - \frac{\mu v}{1-v}\right) K_{n\perp} K_{\perp}(N) K_{от}}{\left[2E \frac{\mu v}{1-v} \frac{\Delta}{d_e} \left(\sum_{i=1}^k \sin^2 \beta_i\right)^{-1} - P(1-\mu)\right] \Phi}, \quad (1)$$

где D , ρ_b , d_3 – скорость детонации, плотность заряжения и диаметр заряда ВВ; c , v , μ – скорость продольной волны, коэффициент Пуассона отдельности массива, коэффициент трения между отдельностями соответственно; $K_{n\perp}$, $K_{\perp}(N)$, $K_{от}$ – показатели, учитывающие взаимодействие зарядов ВВ и открытую поверхность; E – модуль упругости отдельности; Δ , d_e , k , β – соответственно величина смещения отдельностей, размер отдельностей, количество систем трещин, угол наклона системы трещин к обнажению; Φ – показатель трещиноватости горного массива; P – горное давление,

$$P = K\rho gH, \quad (2)$$

K – коэффициент концентрации напряжений, создаваемый за счет образования выработанного пространства и тектонического перемещения плит; ρ – объемная масса горного массива; g – ускорение свободного падения; H – глубина от поверхности Земли.

Достоверность формулы (1) была доказана данными промышленных экспериментов на рудниках ПАО «Приаргунское производственное объединение» (ППГХО) при глубине от поверхности Земли 300-600 м. Результаты расчетов и практических данных приведены на рис.1.

Критическую глубину горного массива определяем по условию удароопасности. Известно, что с увеличением расстояния от земной поверхности напряженное состояние горного массива увеличивается и горные удары происходят при ведении взрывных работ (около 60 %) и бурении

(около 25 %), т.е. при динамическом воздействии на горный массив. При горном ударе, как правило, происходит толчкообразное смещение массива в глубину [6, 7] и выброс горного массива в сторону выработанного пространства. При этом «энергия горного удара складывается из энергии упругих деформаций разрушающейся части горного массива и энергии, выделяющейся из прилегающих пород» [6, 7]. При горном ударе задействуется массив горных пород с радиальным расстоянием от контура выработки, существенно превышающем установленный размер зоны заколов (рис.1). Тогда математически можно предположить, что в этом случае знаменатель в (1) стремится к нулю и R_{03} к бесконечности.

Подставляя (2) в (1), приравнявая знаменатель нулю и решая уравнение, получим формулу для определения критической глубины проявления удароопасности при проходке одиночной выработки:

$$H_{кр} = \frac{2E\mu\nu\Delta}{K\rho g(1-\nu)(1-\mu)d_e \sum_{i=1}^k \sin^2 \beta_i} \quad (3)$$

Анализ зависимости (3) показывает, что с увеличением коэффициента поперечной деформации сжимающая нагрузка компенсируется боковым распираем пород, т.е. с увеличением ν , возрастает $H_{кр}$, что математически отражено в (3). Трение между гранями отдельностей сдерживает отдельности массива от выброса и, с увеличением μ глубина должна быть больше. Чем больше объемная масса вышележащего массива горных пород, тем меньше $H_{кр}$. Промышленными наблюдениями на горизонте 10 рудника № 8 ПАО «ППГХО» [11] установлено, что наиболее частые удароопасные ситуации (динамическое заколообразование) наблюдаются при наличии систем трещин, перпендикулярных обнажениям выработок, что математически получено в формуле (3). Согласно данным [6, 7], в массивах горных пород с большим размером отдельностей d_e величина горного давления больше, значит, вероятность горного удара выше. Данный математический анализ указывает на правомерность полученной формулы для определения глубины динамических проявлений горного давления при проходке одиночных выработок. Для дальнейшего доказательства правомерности полученной формулы (3) проведены ее численные расчеты и сравнение с данными* для ряда месторождений РФ, разрабатываемых подземным способом. Физико-механические свойства пород для расчетов выбраны в [9] и представлены в таблице в виде средних значений.

Численные средние значения параметров для расчетов в формуле (3) равны: $\rho = 2,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; $d_e = 0,4-1,0 \text{ м}$ (0,7 м в среднем); $\mu = 0,3-0,6$ (0,45 в среднем); $\Delta = 10^{-3} \text{ м}$; $\sum_{i=1}^k \sin^2 \beta_i = 1,75$ при $\beta_i = 0; 60; 90^\circ$; $K = 2$.

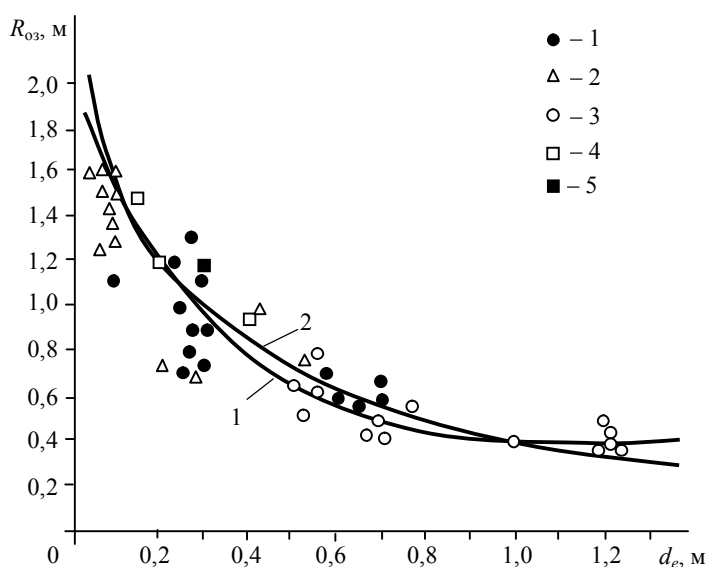


Рис.1. Зависимость расстояния между контуром выработки и границей зоны заколов (максимум напряжений) от размера отдельности, определенная по стенкам выработки в различных массивах горных пород инструментально (дискование керна, ультразвуковые замеры, метод разгрузки, метод параллельных скважин) (1) и теоретически (2) (формула 1)
1 – граниты; 2 – фельзиты; 3 – конгломераты; 4 – трахидациты; 5 – туфогравелиты

* Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам. ...



Принятая и расчетная критическая глубина по условию удароопасности

Месторождение	Породы и руды, склонные к хрупкому разрушению	H_n , м	E , 10^{10} Па	ν	$H_{кр}$, м
Гороблагодатское	Микросиениты, скарны, гранат-магнетитовые породы	300	2,2	0,21	152
Коробковское	Железистые кварциты	600	7,0	0,24	576
Таштагольское	Сиениты, скарны, туфосланцы, железная руда	400	8,0	0,2	588
Шерегешское	Сиениты, граниты, роговики	600	5,8	0,24	644
Криворожское	Граниты	500	6,0	0,23	468
Джезказганское	Песчаники	400	6,9	0,20	450
Зыряновское	Микрокварциты	600	7,5	0,23	585
Миргалимсайское	Известняки, доломиты	400	4,0	0,3	448
Текелийское	Кварциты	600	6,0	0,24	495
Октябрьское и Талнахское	Роговики, габбро-долериты	700	9,4	0,22	692
Хайдорсканское Южное	Известняки	215	3,97	0,25	345
Тырнаузское	Скарны	800	6,0	0,25	523
Апатитовый цирк	Ийолит-уртиты, бедные и богатые руды	200	5,4	0,25	470
Партомчорское	Ийолит-уртиты, бедные и богатые руды	400	5,0	0,25	435
Расвумчорское	Ийолит-уртиты, бедные и богатые руды	400	7,5	0,26	688
Кукисвумчорское	Ийолит-уртиты, бедные и богатые руды	300	7,0	0,22	516
Стрельцовское рудное поле (ПАО «ППГХО»)	Граниты	500	5,3	0,23	413

Примечание. H_n – принятая глубина*; $H_{кр}$ – расчетная критическая глубина.

Упрощенная формула расчета имеет вид

$$H_{кр} = 2,62 \cdot 10^{-8} \frac{E\nu}{(1-\nu)} \quad (4)$$

Численные расчеты по (4) представлены в таблице и на рис.2.

Анализ рис.2 показывает, что с увеличением значения $E\nu(1-\nu)^{-1}$ критическая глубина возрастает, при этом расчетные значения практически находятся на прямой. Разброс фактических значений относительно расчетной кривой в среднем составляет ± 150 м, что весьма

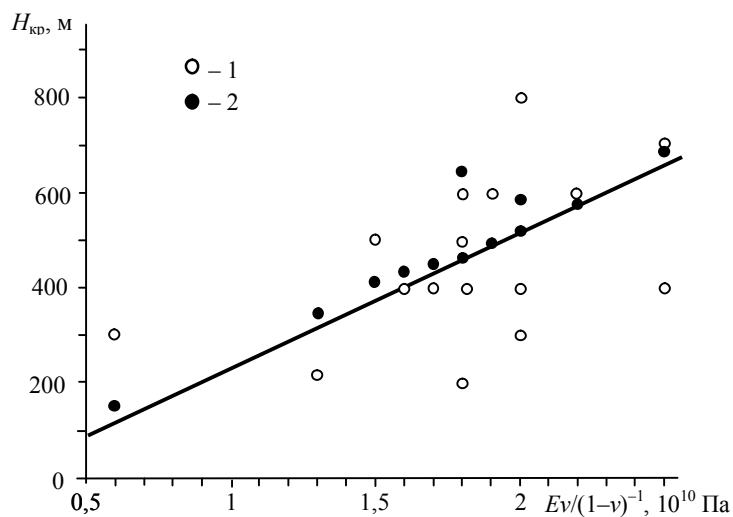


Рис.2. Зависимость критической глубины проявления удароопасности от упругих свойств пород

1 – фактические значения*; 2 – расчетные значения

значительно. Это объясняется тем, что приняты неизвестные средние значения параметров: коэффициент трения между гранями отдельностей, величина смещения и размер отдельности массива, количество систем трещин и их угол наклона к плоскости обнажения, коэффициент концентрации напряжений. Следовательно, формулой (4) можно приближенно оценивать критическую глубину проявления удароопасности. При этом модуль упругости и коэффициент Пуассона определяют в лабораторных условиях по керну разведочных скважин. Коэффициент трения коррелирует с коэффициентом крепости по М.М.Протодяконову [10].

* Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам. ...



Выводы

На основании анализа технической литературы, теоретических исследований, численных расчетов и сравнения их с данными практики отработки удароопасных месторождений можно сделать следующие выводы:

1. Разработана теоретическая формула расчета критической глубины месторождения по условию удароопасности при проходке одиночной выработки. Формула учитывает физико-технические свойства горного массива, параметры его трещиноватости, концентрацию напряжений вблизи выработки.

2. Математический анализ и численные расчеты по формуле доказывают ее правомерность. Разброс фактической и расчетной критической глубины по упрощенной формуле расчета (4) объясняется отсутствием фактических данных по значениям коэффициента трения и параметрам трещиноватости горного массива, концентрации напряжений вблизи выработки.

3. Упрощенной формулой расчета можно приближенно оценить критическую глубину месторождения на стадии изысканий и проектирования.

4. Более точные результаты могут быть получены при наличии фактических данных о параметрах трещиноватости, коэффициентов трения и концентрации напряжений вблизи выработанного пространства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов А.А. Совершенствование практики отнесения месторождений к склонным по горным ударам / А.А.Аксенов, И.А.Ожиганов // Безопасность труда в промышленности. 2018. № 1. С.58-60. DOI: 10.24000/0409-2961-218-1-58-60
2. Геодинамическое состояние массива пород Николаевского полиметаллического месторождения и особенности проявления удароопасности при его освоении / И.Ю.Рассказов, Б.Г.Саксин, В.И.Усиков, М.И.Потапчук // Горный журнал. 2016. № 12. С. 23-25. DOI: 10.17580/gzh.2016.12.03
3. Геомеханическая оценка геотехнологий подземной добычи руд на стадии проектных решений / А.М.Фрейдin, С.А.Неверов, А.А.Неверов, А.И.Конурин // Горный журнал. 2016. № 2. С. 39-44. DOI: 10.17580/gzh.2016.02.08
4. Куранов А.Д. Применение численного моделирования для выбора безопасных параметров систем разработки рудных месторождений в высоконапряженных массивах // Записки Горного института. 2013. Т. 206. С. 60-64.
5. О связи объема очаговой зоны разрушения с сейсмической энергией горного удара / В.С.Ломакин, С.В.Григорович, Р.П.Потехин, Н.И.Халевин // Геология и геофизика. 1989. № 5. С. 129-132.
6. Петухов И.М. Классификация горных ударов // Безопасность труда в промышленности. 1987. № 12. С. 41-43.
7. Петухов И.М. О природе толчкообразного деформирования горного массива // Горный журнал. 1989. № 7. С.45-48.
8. Рассказов И.Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона. М.: Горная книга, 2008. 329 с.
9. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / Под ред. Н.В.Мельникова, В.В.Ржевского, М.М.Протодьяконова. М.: Недра, 1975. 279 с.
10. Тюпин В.Н. Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах / Белгородский национальный исследовательский университет. Белгород, 2017. 192 с.
11. Analysis on deformation development of open-pit slope under the influence of underground mining / N.Wang, B.H.Wan, P.Zhang, X.L.Du // Proceedings of International Symposium on Land Reclamation and Ecological Restoration. Beijing, China. 2015. P. 53-58.
12. Braun L.G. Seismic hazard evaluation using apparent stress ratio for mining-induced seismic events // Ph. D. Thesis, Laurentian University. 2015. 257 p.
13. Ingraham M.D. Use of acoustic emission to investigate localization in high-porosity sandstone subjected to true triaxial stresses / M.D.Ingraham, K.A.Issen, D.J.Holcomb // Acta Geotechnica. 2013. Vol. 8. № 6. P. 646-663.
14. Marcak M. Seismic activation of tectonic stresses by mining / M.Marcak, G.Mutke // Journal of Seismology. 2013. Vol. 17. № 4. P. 1139-1148.
15. Snelling P.E. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada / P.E.Snelling, L.Godin, S.D.McKinnon // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013. Vol. 58. P. 166-179.
16. Young D.P. Energy variations in mining-induced seismic events using apparent stress // MASc Thesis. Laurentian University. 2012. 85 p.
17. Wesseloo J. Grid-based analysis of seismic data / J.Wesseloo, K.Woodward, J.Pereira // The Journal of Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2014. Vol. 114. P. 815-822.

Автор В.Н.Тюпин, д-р техн. наук, профессор, tyupinvn@mail.ru (Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия).

Статья поступила в редакцию 18.03.2018.

Статья принята к публикации 25.01.2019.