

УДК 624.131.4

ВЛИЯНИЕ ЛИТОЛОГО–ТЕКТОНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА НАПРЯЖЕННО–ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГОРНОГО МАССИВА

ЧАН ЮН БОК*,
О.А. ВОВК**

* Технологический университет им. Ким Чека, КНДР,

** Киевский Национальный Университет "КПИ", Киев

Получено 25.02.2003

Напряженно–деформированное состояние горного массива определяется физико–механическими, в первую очередь, упругими свойствами пород, глубиной залегания от поверхности и особенностями литолого–тектонического строения. В зависимости от характера структурной нарушенности массива тектоническими процессами в нем могут образовываться очаги повышенной концентрации напряжений, и при наличии обнажений вблизи этих очагов возможны разрушения породы в объеме очага с высвобождением энергии в форме движения горной породы в направлении обнажения и в виде сейсмических колебаний, достигающих поверхности. Это явление, называемое горным или тектоническим ударом, вызывает разрушение и повреждение подземных выработок и оказывает вредное воздействие на поверхностные объекты. В статье изложены критерии энергетической оценки горного (тектонического) удара и способы расчета параметров сейсмических волн.

Пружно–деформований стан гірського масиву визначається фізико–механічними, у першу чергу, пружними властивостями порід, глибиною залягання від поверхні та особливостями літолого–тектонічної будови. В залежності від характеру структурного порушення масиву тектонічними процесами в ньому можуть утворюватися вогнища підвищених концентрацій напруг і при наявності поблизу оголень можливе руйнування породи зі звільненням енергії в формі руху гірської породи в напрямку вільного простору, а також у вигляді сейсмічних коливань, що досягають поверхні землі. Це явище, назване гірським або тектонічним ударом, викликає руйнування підземних виробок та здійснює негативний вплив на поверхневі об'єкти. В статті викладені критерії енергетичної оцінки гірського (тектонічного) удара і методи обрахування параметрів сейсмічних хвиль

The stress–strain state of a rock massif is determined by physico–mechanical, first of all, by elastic properties of rocks, a depth of occurring from a surface and features of a lithological–tectonic structure. The centers of the increased concentration of stresses can be formed in a massif depending on character of structural disruption of tectonic processes. At presence of free surfaces near these centers there are possible the rock destructions in the volume of this center with an energy releasing in the form of rock movement in a direction of free surface and as seismic vibrations reaching earth surface. This phenomenon named as rock or tectonic impact causes destruction and damage of underground mines and also exerts harmful influence on surface objects. In the work the criteria of a power estimation of the rock (tectonic) impact and the ways of determination of seismic wave parameters are presented.

ВВЕДЕНИЕ

Выемка полезного ископаемого подземным способом с образованием пустот сопровождается сдвижением пород, доходящих до дневной поверхности, вызывая ее оседание. Почва под поверхностными зданиями и природными объектами (водоемами, берегами рек, горными склонами) испытывает деформации, приводящие к разрушению этих объектов. Особо опасны эти процессы в сочетании с сейсмическим действием взрывных работ, землетрясений или горных ударов. Последние опасны как для подземных выработок, так и для поверхностных зданий и сооружений, причем интенсивность и количество ударов с увеличением глубины возрастает. Горные удары являются следствием накопления упругой энергии выше определенных критических значений и ее высвобождения в виде кинетической составляющей дви-

жения разрушенной в направлении обнажения породы и упругих сейсмических волн различной интенсивности.

Таким образом, для прогнозирования горного удара и его динамических и энергетических параметров необходимо рассматривать напряженно–деформированное состояние массива в районе ведения горных работ с учетом литологических и тектонических особенностей с целью выявления зон повышенной концентрации напряжений как потенциальных очагов горного удара. Энергетические параметры горного удара в наибольшей мере зависят от прочностных и упругих свойств пород, а также от глубины залегания породы и литологического строения. Особо опасными являются места концентрации упругой энергии в районе горно–тектонических нарушений, характеризующиеся неравномерными гравитационно–тектоническими полями напряжений.

1. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОРОДЫ В ЛИТОСФЕРЕ

Напряженно-деформированное состояние элемента горного массива зависит от глубины залегания H от поверхности и описывается в состоянии равновесия двумя системами уравнений $\Sigma P = 0$ и $\Sigma M = 0$, а в общем виде тензорами напряжений T_n и деформаций T_d , состоящих из шаровой (T_σ^0, T_d^0) и девиаторной (D_σ, D_d) частей.

При решении прикладных задач часто используют величину, называемую интенсивностью касательных τ_i и нормальных σ_i напряжений,

$$\tau_i = \sqrt{J_2(D_\sigma)}, \quad \sigma_i = \sqrt{3\tau_i},$$

где J_2 – второй инвариант девиатора. На рис. 1 приведена схема силового поля, действующего на элемент массива на глубине H . Величина главных напряжений в ненарушенном массиве при трехос-

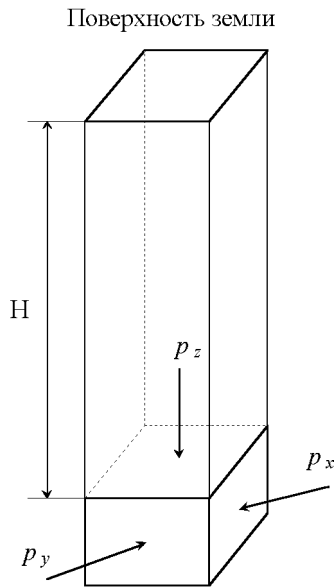


Рис. 1. Напряженное состояние породы в ненарушенном массиве на глубине H : p_z – вертикальное, p_x, p_y – горизонтальные давления

ном нагружении определяется из выражений

$$\sigma_1 = p_z = \gamma \cdot gH, \tag{1}$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \frac{\sigma_1}{m - 1}, \tag{2}$$

где H – глубина рассматриваемого элемента породы; γ – плотность породы; g – ускорение силы тяжести; m – функция Пуассона, т. е. величина, обратная коэффициенту Пуассона ($m = 1/\nu$).

Закономерность нарастания метостатических главных напряжений с глубиной видна из рис. 2, а зависимость функции Пуассона m от давления приведена на рис. 3. Соотношения (1), (2) и зависимости, приведенные на рис. 2 и 3, как уже отмечалось выше, справедливы для условий ненарушенного массива и при отсутствии тектонических аномалий. В качестве примера в табл. 1 приводятся

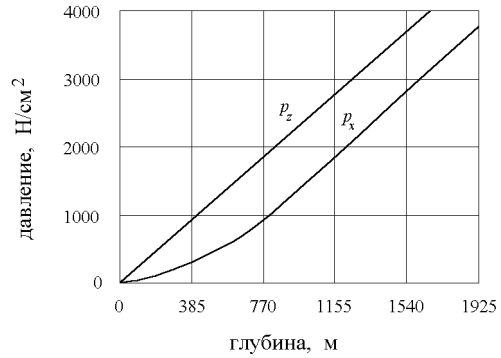


Рис. 2. Зависимость давления от глубины в ненарушенном литостатическом состоянии

ся данные зависимости m от глубины залегания в диапазоне 122–1200 м для разных материалов карбонатной литологической формации в указанных условиях.

Табл. 1. Значение m для различных пород и глубин залегания

Порода	Значения m при глубине H , м		
	122	620	1200
Песчаник	20	9	4
Сланец	12	7	3.5
Уголь	3	2.5	2

В общем случае горизонтальные напряжения в равновесном состоянии, согласно [1], будут

$$p_x = p_y = \beta p_z, \tag{3}$$

где $\beta = 1.135 - 0.556 \text{tg} \varphi$.

Упругая деформация описывается согласно обобщенному закону Гука следующим выражением:

$$\varepsilon_z = \frac{1 - \nu - 2\nu^2}{1 - \nu} \cdot p_z. \tag{4}$$

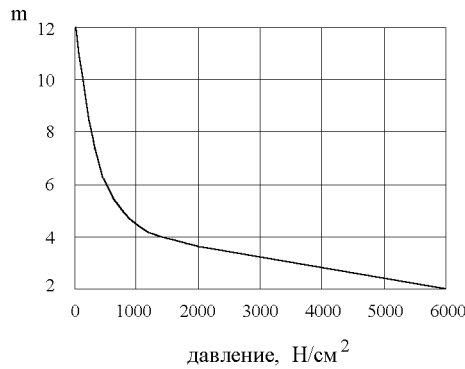


Рис. 3. Изменение функции Пуассона в зависимости от глубины в литосфере в нормальном литологическом состоянии [1]

2. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА ПРИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЯХ

При наличии тектонических нарушений, как, например, на рис. 4, картина напряженно-деформированного состояния будет иной. Как видно из рис. 5, элемент породы может находиться в двух тектонических состояниях: всестороннего

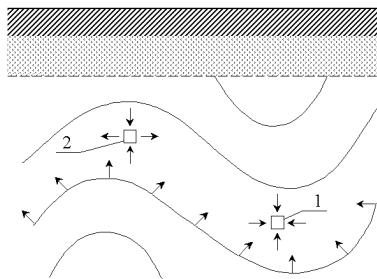


Рис. 4. Схема напряженного состояния при наличии тектонических нарушений:

a – всестороннее сжатие,
b – растяжение в горизонтальном направлении

сжатия (рис. 5, *a*) и растяжения в горизонтальном направлении (рис. 5, *b*). При этом горизонтальные напряжения могут во много раз превышать вертикальные.

Высокая асимметрическая литологическая напряженность может быть одной из причин горно-тектонического удара, возникающего вследствие концентрации напряжений. Под горно-тектоническим ударом подразумевают мощное динамическое проявление горного давления в виде мгновенного разрушения породы в глубине

массива и вызывающее хрупкое разрушение стенок породы в выработках и целиках. Горно-тектонический удар сопровождается сильным сотрясением массива с возбуждением сейсмических волн значительной интенсивности, достигающих поверхности. Энергетический уровень горно-тектонического удара находится в пределах $A_n = 10^8 - 10^{12}$ Дж. В табл. 2 приведены примеры горно-тектонических ударов и их характеристика. В массивах месторождений, где есть угроза горно-тектонических ударов, действуют резко неравномерные по направлениям в пространстве гравитационно-тектонические поля напряжений, в которых вертикальная компонента главных напряжений является наименьшей по абсолютной величине. Диагностика этих явлений строится на изучении напряженного состояния пород в нетронутом массиве и вокруг выработок с учетом свойств пород и тектонических нарушений. Относительно свойств пород важным фактором является их упругость (т. е. высокий модуль деформации) и склонность к хрупкому разрушению. На рис. 6 приведены соотношения $\sigma \sim \varepsilon$, характеризующие это свойство такими соотношениями:

$$k_{хр} = \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p}, \quad k_{деф} = \frac{\varepsilon_{упр}}{\varepsilon_{общ}}, \quad (5)$$

где $k_{хр}$ – коэффициент хрупкости; $k_{деф}$ – коэффициент деформации; $\sigma_{сж}, \sigma_p$ – прочность пород на сжатие и растяжение; $\varepsilon_{упр}, \varepsilon_{общ}$ – упругая и общая деформации.

Наибольшую опасность представляют очаги, формирующиеся в хрупких породах, соответствующих кривой *a* на рис. 6, в то время как в породах с модулем упругости $2 \cdot 10^4$ МПа и меньше избыточные горизонтальные напряжения либо незначительно выше литостатических напряжений γH , либо вообще отсутствуют. В наибольшей мере это соответствует кривой *c* на рис. 6 и частично кривой *b*. В то же время, на одном из апатитовых рудников России в породах с модулем упругости $E \geq 8 \cdot 10^4$ МПа наблюдались избыточные горизонтальные напряжения, в 10–20 раз превышающие вертикальные литостатические.

При наличии в массиве обнажений, в частности, горизонтальных выработок круглого сечения (рис. 7), напряженное состояние определяется окружным σ_t , радиальным σ_r и касательным τ напряжениями. Величина окружного напряжения в общем виде находится как

$$\sigma_t = p_z(1 + 2 \cos 2\varphi), \quad (6)$$

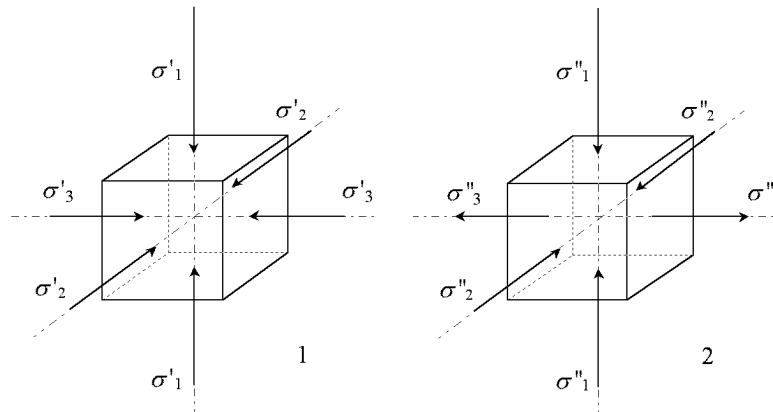


Рис. 5. Два напряженных тектонических состояния:
a – всестороннее сжатие, *b* – растяжение в горизонтальном направлении

Табл. 2. Характеристика энергии и параметров очагов горно-тектонических ударов

Местоположение удара	Энергия, Дж	Видимый поперечный размер очаговой области, м	Глубина очага, м
Кировский апатитовый рудник (Россия)	10^{12}	1100	500
Шахта "Кузбасская" южно-уральского бокситового рудника (Россия)	$10^{10}-10^{11}$	650	400
Шахта "Умбозеро" "Севередмет" (Россия)	10^9	200	350
Североуральский бокситовый рудник (Россия)	$3.2 \cdot 10^8$	40-100	600
Шахта "Czeczott" в районе Беруня (Польша), (5.05.1992 г)	$2 \cdot 10^9$	–	–
Шахта "Lubin" шахто-управления ZGOM (30.03.1977)	$2.5 \cdot 10^{10}$	магнитуда $M > 4.5$	–

при $\varphi = 0^0$

$$\sigma_t = \frac{p_z}{2} \left(2 + \frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4} \right), \quad (7)$$

Радиальные напряжения будут соответственно

$$\sigma_r^0 = 3\frac{p_z}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \frac{a^2}{r^2}, \quad (9)$$

при $\varphi = 90^0$

$$\sigma_t = \frac{p_z}{2} \left(1 - 3\frac{a^2}{r^2} \right) \frac{a^2}{r^2}. \quad (8)$$

$$\sigma_r^{90} = \frac{p_z}{2} \left(2 - 5\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4} \right). \quad (10)$$

Касательные напряжения в обоих случаях равны нулю.

При $\varphi = 45^0$

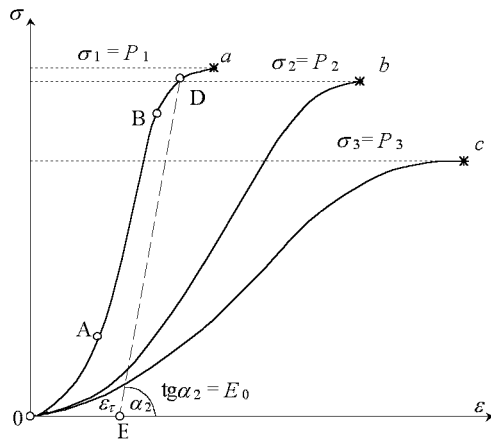


Рис. 6. Схематический график функции $\sigma = f(\epsilon)$ для горных пород с различными свойствами: а) хрупких, б) полухрупких, в) податливых (полупластичных), p_1, p_2, p_3 – прочность породы

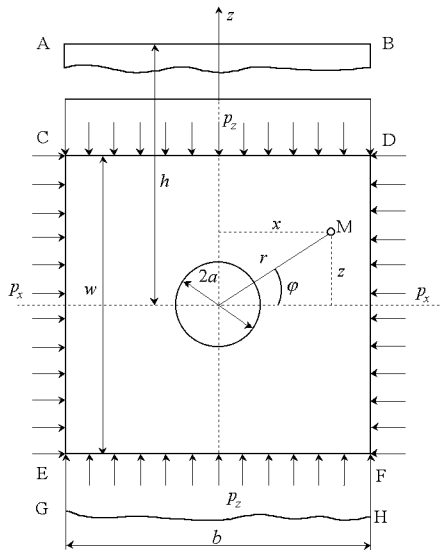


Рис. 7. Картина напряженного состояния массива вокруг горизонтальной выработки радиусом a в плоскости CDEF: p_z, p_x – вертикальная, горизонтальная компоненты соответственно

$$\tau = \frac{p_z}{2} \left(2 + \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right). \quad (11)$$

Максимальное значение τ будет на расстоянии $r = a\sqrt{3}$ от центра выработки и составит

$$\tau_{max} = \frac{2}{3} p_z. \quad (12)$$

Радиальные напряжения в этом случае будут

$$\sigma_r^{45} = \frac{p_z}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right), \quad (13)$$

а окружные –

$$\sigma_t^{45} = \frac{p_z}{2} \left(2 + \frac{a^2}{r^2} \right). \quad (14)$$

Главные напряжения $\sigma_{1,2}$, согласно выражений (6)–(14), могут быть получены по формуле

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{2} (\sigma_z + \sigma_t) \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_t - \sigma_r)^2 + 4\tau^2}. \quad (15)$$

При значении коэффициента хрупкости $k_{хр}$ больше 10 и $\sigma > 0.8\sigma_{сж}$ (σ – напряжение, действующее вблизи контура выработки или целика) могут возникать стреляние и горные удары, поэтому необходимо определить критерии оценки вероятности этих явлений и прогнозирования вероятности их возникновения. Реализация этого события возможна лишь при условии накопления упругой энергии выше определенных критических значений и создания условий для ее высвобождения, в частности, плоскости обнажения. Если известны скорости продольных V_p и поперечных V_s волн, а также плотность породы ρ , то динамические модули упругости E_d и коэффициент Пуассона ν_d могут быть определены следующим образом:

$$E_d = 2V_s^2 \cdot \rho(1 - \nu), \quad \nu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}, \quad (16)$$

где $\nu = \epsilon_x / \epsilon_y$.

Энергия упругих деформаций Φ может быть найдена в виде потенциальной энергии по уравнению Клапейрона:

$$\Phi = \frac{1}{2} (\sigma_x \cdot \epsilon_x + \sigma_y \cdot \epsilon_y + \sigma_z \cdot \epsilon_z + \tau_{xy} \cdot \nu_{xy} + \tau_{yz} \cdot \nu_{yz} + \tau_{zx} \cdot \nu_{zx}). \quad (17)$$

Эту энергию можно подразделить на энергию объемной деформации Φ_0 и энергию формоизменения Φ_Φ , которая может быть выражена через напряжения в виде:

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_\Phi = \frac{1 - 2\nu}{6E} [(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)^2] + \frac{1 + \nu}{6E} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)], \quad (18)$$

а через главные напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ соотношения (18) могут быть записаны как

$$\Phi_0 = \frac{1-2\nu}{6E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + (\sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2 \cdot \sigma_3 + \sigma_3 \cdot \sigma_1)], \quad (19)$$

$$\Phi_\Phi = \frac{1+\nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]. \quad (20)$$

Из соотношений (18) и (19) видно, что при $\nu \rightarrow 0.5$ энергия объемной деформации стремится к нулю. Влияние всего комплекса горно-технических факторов на удароопасное состояние массива можно описать, используя следующие параметры: M – модуль спада энергии в очаге горного удара; E – модуль упругости пород, окружающих очаг разрушения; A – размер зоны запредельного деформирования, зависящей от размеров выработанного пространства. Для одиночной выработки таким характерным размером будет ее высота h или диаметр a . Соотношение первых двух величин характеризует энергообмен между очагом горного удара и вмещающими породами. Размер зоны запредельного деформирования является прогнозной величиной на предмет вероятного разрушения при горном ударе, т. е. радиусом очага. В комплексе сочетание всех этих параметров позволяет говорить о силе горного удара.

На основании экспериментальных данных нами анализируется влияние перечисленных параметров на удароопасное состояние краевых частей массива. Оценить на практике удароопасность массива по его деформационным свойствам в настоящее время не представляется возможным по техническим причинам. Достаточно надежно инструментальному измерению они поддаются только в лабораторных условиях, а практическое применение находят при качественной оценке удароопасности пород.

После осмысливания роли запредельных характеристик в теории горных ударов наиболее информативным показателем следует считать коэффициент удароопасности

$$\lambda = \frac{M}{E}. \quad (21)$$

Порода считается удароопасной при $\lambda > 1$.

По результатам испытания пород из скважин, пробуренных на глубинах 1105–1245 м, согласно

критерию (21), можно сделать вывод о том, что породы, проявляющие удароопасные свойства (роговики, альбититы, железная руда и кварциты), по данным эксперимента имеют коэффициент удароопасности $\lambda > 3$. Повышение порога опасности в природных условиях объясняется возрастанием доли пластической деформации при деформировании краевых частей массива по сравнению с деформированием образца под прессом, что при прочих равных условиях повышает энергоемкость разрушаемого объема материала.

Полученный критерий опасности распространяется на выработки, проходимые вне зоны влияния очистных работ. В зоне влияния очистных работ, когда приток энергии в вероятный очаг разрушения будет определяться не только внутренним состоянием массива в естественном залегании, но и в не меньшей степени геометрией выработанных пространств, порог опасности может быть снижен.

К достоинствам коэффициента удароопасности λ следует отнести возможность расположить породы, слагающие месторождение, в ряд опасности. Породы с наибольшим коэффициентом удароопасности чаще подвержены разрушению в динамической форме. Так, испытанные породы в ряду убывающей активности располагаются в следующей последовательности: альбититы, роговики, кварциты, железная руда.

Таким образом, по коэффициенту удароопасности можно достоверно судить об относительной опасности исследуемого материала, а численный критерий опасности для конкретных горно-технических ситуаций будет величиной индивидуальной. При оценке удароопасности конкретной горно-технической ситуации, кроме деформационных свойств материала в очаге горного удара и в окружающем массиве, необходимо знание размеров зон запредельного деформирования. В одинаковых внешних условиях нагружения главное значение при формировании зон запредельного деформирования приобретают неоднородности массива. Рельефным показателем неоднородности служит параметр A . Он комплексно отражает изменение прочностных свойств массива, модуля упругости и, что самое важное, модуля спада. При этом росту A соответствует уменьшение модуля спада, и, следовательно, отношения M/E , характеризующего опасность горно-технической ситуации по проявлению горных ударов, что отвечает падению опасности в вертикальном отношении. При высоте подготовительной выработки 2.5–4.0 м модуль спада близок к нулю при значении параметра $A/h = 0.8$.

Снижение частоты горных ударов с ростом этого отношения сопровождается увеличением силы горного удара и объема производимого разрушения. Так как надежному инструментальному измерению поддаются лишь параметры A и h , то приходится принимать те или иные гипотезы о связи M , A , h , проверяя их в дальнейшем на практике прямым сопоставлением с экспериментом. Из анализа горных ударов можно видеть, что

$$M = M_0 \left(\frac{h}{A} \right)^n, \quad (22)$$

где M_0 – критическое значение модуля спада при заданных условиях нагружения; n – эмпирический коэффициент.

Отнеся данное выражение к энергии, запасенной в окружающем массиве и определяемой его модулем упругости, получим критерий, областью применения которого являются горно-технические ситуации, когда изменения в опорном давлении вызываются местными неоднородностями

$$\frac{M_0}{E} \cdot \left(\frac{h}{A} \right)^n \geq \mu_0. \quad (23)$$

Для перехода к численной реализации данной формулы необходимы дополнительные исследования по определению параметров, в нее входящих.

Вопрос энергообмена между породами, окружающими очаг горного удара, и разрушаемым материалом необходимо рассматривать совместно с силовым критерием неустойчивости, находящем применение при оценке степени удароопасности краевых частей массива с использованием данных по определению величины нагрузок к максимуму опорного давления и расстояния до максимума от обнажения.

Представляя горный удар как явление, в подготовке и протекании которого важную роль играет характер распределения нагрузок не только с удалением в массив, но и вдоль обнажения, можно существенно повысить достоверность прогноза, учитывая эти два фактора одновременно.

Очевидно, что благоприятные условия разрушения пород складываются при превышении действующими в массиве напряжениями прочности пород на обнажении. Протяженность очага предельно напряженного состояния в данном случае на проявление горного удара и его признаков существенно не влияет. Разрушение может протекать на различной площади обнажения и проявляется в виде шелушения, интенсивного заколообразования и стрелянки горных пород.

Как показали результаты обобщения размеров

очагов горных ударов, происшедших в подготовительных выработках высотой 2.5–4.0 м, условие разрушения сохраняется при соотношении параметров $A/h \leq 0.8$. В то же время возникновение горного удара как явление выноса разрушенного материала в выработку, возможно лишь в области $b > 16(A/h)^2$, где b – линейный размер формирующего очага горного удара вдоль обнажения. Расстояние до максимума опорных нагрузок в данном случае отождествляется с глубиной полости разрушения пород при горном ударе.

На рис. 8 в качестве примера приведена схема распределения гравитационных σ_z и тектонических σ_x напряжений при наличии выработанного пространства в апатитовом руднике. Как и следовало ожидать, максимальная их концентрация наблюдается в окрестности выработок. Другим фактором возникновения горно-тектонических ударов, помимо высокой тектонической напряженности, является структурная нарушенность массива (разрывные тектонические нарушения) как результат структурно-блоковых подвижек массива, обусловленных их современным геодинамическим режимом.

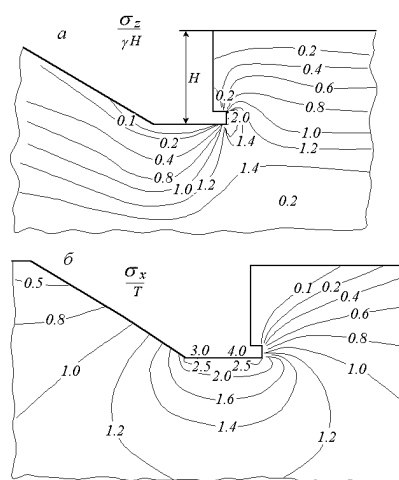


Рис. 8. Распределение гравитационных и тектонических напряжений вокруг выработанного пространства на апатитовых рудниках: a – вертикальные напряжения σ_z от действия гравитационных сил γH ; b – горизонтальные напряжения σ_x от действия тектонических сил T [5]

Одним из главных критериев оценки горно-тектонического удара является энергетический фактор. Накопленная потенциальная энергия очага может быть реализована как в виде кинетического движения разрушенной породы вплоть до выброса ее в свободное пространство, так и в ви-

де сейсмической волны, способной разрушить или повредить подземные выработки и поверхностные здания и сооружения.

Часть энергии расходуется на разрушение породы в объеме очага. Она может быть определена в лабораторных условиях.

Рассмотрим сейсмическое воздействие горно-тектонического удара на окружающую среду, происходящего на значительной глубине в районе шахтного поля.

На свободной поверхности в пункте наблюдения фиксируется плотность потока сейсмической энергии E_r , Дж/м², которая с достаточной для практических целей точностью определяется по формуле

$$E_r = 0.625 \rho V_p U_{max}^2 T, \quad (24)$$

где ρ – плотность грунта, кг/м³; V_p – скорость распространения продольной волны, м/с; U_{max}^2 – максимальная амплитуда скорости смещения грунта по одной из составляющих x или y , м/с; T – период колебания, с.

При использовании формулы (24) для определения сейсмической энергии источника колебаний, закономерностей распространения сейсмической энергии в глубине массива пород амплитуда скорости принимается равной половине от измеренной за счет эффекта отражения волны от свободной поверхности.

Сейсмическая энергия E_c , Дж, связана с плотностью потока сейсмической энергии следующим соотношением:

$$E_c = 12.56 E_r \cdot r^2, \quad (25)$$

где r – расстояние от точки наблюдения до источника сейсмической энергии, м, или, другими словами, это радиус сферической поверхности с центром в месте нахождения источника энергии.

Сейсмическая энергия при ее распространении вдоль дневной поверхности, сложенной мягкими грунтами, затухает согласно зависимости

$$E_c = E_{0c} \cdot 0.7 \cdot e^{-1.75 \cdot 10^{-3} \cdot r}, \quad (26)$$

где E_{0c} – полная сейсмическая энергия источника колебаний, Дж.

Зная один из параметров (24)–(26) сейсмической энергии, полученный, например, измерением или другим расчетным путем, физико-механические свойства пород и допустимую скорость смещения $U_{доп}$ или ускорения для охраняемого объекта, можно определить сейсмобезопасное расстояние, м:

$$r_{6ез} = 0.357 \sqrt{\frac{E_c}{\rho V_p \cdot U_{max}^2 \cdot T}}. \quad (27)$$

Период колебаний (с) можно определить из зависимости

$$T_p = 1.45 \cdot 10^{-3} \cdot r_{и}^{1.15}, \quad (28)$$

где $r_{и}$ – радиус сейсмоизлучателя, м, который определяется одной из формул

$$r_{и} = 0.118 E_{0c}^{1/3} \quad \text{или} \quad r_{и} = 0.03 E_{0c}^{1/3}, \quad (29)$$

где E_0 – полная энергия источника колебаний, Дж.

Удельная потенциальная упругая энергия в очаге находится из выражений (17)–(20), однако для нахождения полной энергии необходимо знать размеры очага. При анализе сейсмического влияния горного удара на поверхности нам необходимо определить сейсмическую компоненту, которая, согласно [1], может быть найдена из выражения

$$E_{0c} = 0.002 \frac{p_z^2 \cdot h}{E_z \cdot \alpha_p} \left[\operatorname{tg} h(\alpha_p l_p) - \frac{\alpha_p l_p}{\operatorname{cosh} h(\alpha_p l_p)} \right]^2, \quad (30)$$

где h – мощность обнажаемого слоя (пласта); p_z – вертикальная составляющая давления; E_z – линейный модуль упругости по вертикали; α_p, l_p – эксплутационные константы, определяемые для конкретных условий.

Из формулы (29), зная величину сейсмической энергии в очаге, можно получить значение полной энергии очага, которая будет

$$E_0 = 60.84 E_{0c}, \quad (31)$$

т. е. сейсмическая энергия равна 0.016 от потенциальной энергии очага или близка к 2%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Напряженно-деформированное состояние породы в ненарушенном массиве зависит от упругих характеристик породы и глубины залегания. При наличии тектонических нарушений элемент породы может находиться не только в состоянии всестороннего сжатия, но и подвергаться растягивающим усилиям в горизонтальном направлении. При этом горизонтальная составляющая любого знака может во много раз превосходить вертикальную.

2. Очаги указанной тектонической напряженности при появлении обнаженных поверхностей вблизи очага горного удара являются наиболее вероятными местами возникновения тектонических ударов, особенно в породах с коэффициентом хрупкости более 10.

3. Сейсмическое воздействие горно-тектонических ударов на окружающую среду зависит от энергетических характеристик очага, в частности, от величины сейсмической энергии очага и плотности на внешней его границе.

4. Сейсмическая энергия составляет около 2% от общей потенциальной энергии очага. Зная величину этой энергии, можно определить радиус сейсмозлучения, т. е. радиус очага, по формуле (29).

1. Chudek M. Geomechanika.– Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Slaskiej, 2002.– 637 с.
2. Goszcz A. Elementy mechaniki skal oraz tapania w polskich kopalniach Węgla i Miedzi.– Krakow: Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej.–Seria z lampka Gornicza, N2, 2000.– 237 с.
3. Чан Юн Бок, Вовк О. А. Влияние упругих возмущений на физико-механические свойства породного массива // В сб. Материалы международной конференции. V Jubileuszowa Szkoła Geomechaniki.– Gliwice-Ustron, 2001.– С. 23–34.
4. Chudek M., Kuzmenko A. A., Wowk O. A. O prognozowaniu intensywności sejsmicznego oddziaływania tapniecia // В сб. Материалы международной конференции. X Jubileuszowe "Geotechnika-Geotechniks 2002".– Gliwice-Ustron, 2002.– С. 195–205.
5. Ловчиков А. В. Горно-тектонические удары на российских рудниках: статистика и некоторые закономерности // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.– 1997.– N2.– С. 22–31.