

УДК 622.235.575.2

## ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ПРИ ГОРНЫХ УДАРАХ

А. А. ВОВК,\* А. А. КУЗЬМЕНКО,\* О. А. ВОВК \*\*

\* Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

\*\* Национальный авиационный университет, Киев

Получено 26.06.2005

При подземной разработке месторождений на больших глубинах в результате изменений в напряженном состоянии пород, происходящих в результате выемки горной массы из подготовительных и очистных выработок и появления при этом мест концентрации упругой энергии, возникают очаги внезапного разрушения породы с излучением в окружающий массив сейсмических колебаний. В зависимости от выделяемой энергии (горные удары). В зависимости от выделяемой энергии сейсмические волны могут представлять для подземных выработок и поверхностных сооружений опасность повреждения или разрушения. В статье для оценки энергетических параметров горного удара принята гипотеза прочности по потенциальной энергии формоизменения, рассмотрены наиболее распространенные конструкции очагов горных ударов (сферические, цилиндрические) и приведены методы расчета параметров сейсмических колебаний.

Розробка корисних копалин на значних глибинах, яка пов'язана з появою при цьому місць концентрації пружної енергії, спричиняє утворенню вогнищ раптового руйнування породи з випромінюванням у навколишнє середовище сейсмічних коливань (гірничі удари). В залежності від кількості випромінюваної енергії сейсмічні хвилі можуть являти собою загрозу руйнування чи пошкодження як підземних, так і надземних споруд. У статті для оцінки енергетичних параметрів гірничого удару запропонована гіпотеза міцності по потенціалній енергії деформації формоутворення, розглянуті найбільш розповсюджені конфігурації вогнищ гірничих ударів (сферична, циліндрична) та наведені методи розрахунку параметрів сейсмічних коливань.

While underground explosion the tense condition of the rock is changed as a result of the rock extraction and appearance of the places of the extensible energy. Taking into account abovementioned the places of unexpected destruction of the rock are appeared and the seismic waves are radiated into rock massive (it could be named as rock stroke). Such seismic waves could be unsafe for as underground so for ground constructions (damage and even destruction of the construction). A hypothesis of stability on potential energy of formchanging was propound. Commonly known configuration of the places of rock strokes (spherical and cylindrical) were considered; methods for the calculation of the seismic waves parameters were set.

### ВВЕДЕНИЕ

Горные удары, возникающие в процессе выемки горных пород в подземных условиях в местах концентрации упругой энергии, возбуждают сейсмические волны высокой интенсивности, способные вызывать разрушения или повреждения подземных выработок. По мере увеличения глубины разработки эти события возникают более часто, а их энергетические и геометрические параметры значительно возрастают. Поэтому рассмотрение вопросов динамики зарождения очагов горных ударов в зависимости от литологических и технологических факторов, энергетических и динамических параметров возбуждаемых ими деформаций и волновых процессов становится одной из наиболее актуальных задач горного дела.

Закономерности зарождения и движения сейсмических волн при горных ударах изучены недостаточно. Для описания этих процессов необходимо привлечение аналитического аппарата промышленной сейсмологии. Но при этом следует учитывать разницу в механизме и характере возбуж-

дения сейсмозрывных волн по сравнению с колебаниями грунта при горных ударах. Так, в первом случае сейсмическая волна возникает в результате трансформации пластической (или упруго-пластической) волны при снижении давления на ее фронте до значений упругих деформаций, во втором – как результат высвобождения упругой энергии при разрушении определенного объема породы в очаге и излучения какой-либо части этой энергии в виде сейсмических колебаний. Различный механизм зарождения сейсмических волн затрудняет формулирование начальных условий, но на определенном удалении от источника возбуждения имеет место идентичность их движения в обоих случаях, особенно при конфигурации очага горного удара, близкой к сферической. С момента, когда фронт волны примет указанную (каноническую) конфигурацию, параметры затухания с расстоянием могут быть найдены с помощью обычных законов теории упругости при любом источнике волновых возмущений.

В настоящей статье делается попытка использовать закон затухания сейсмозрывных волн применительно к задаче прогнозирования сейсмобе-

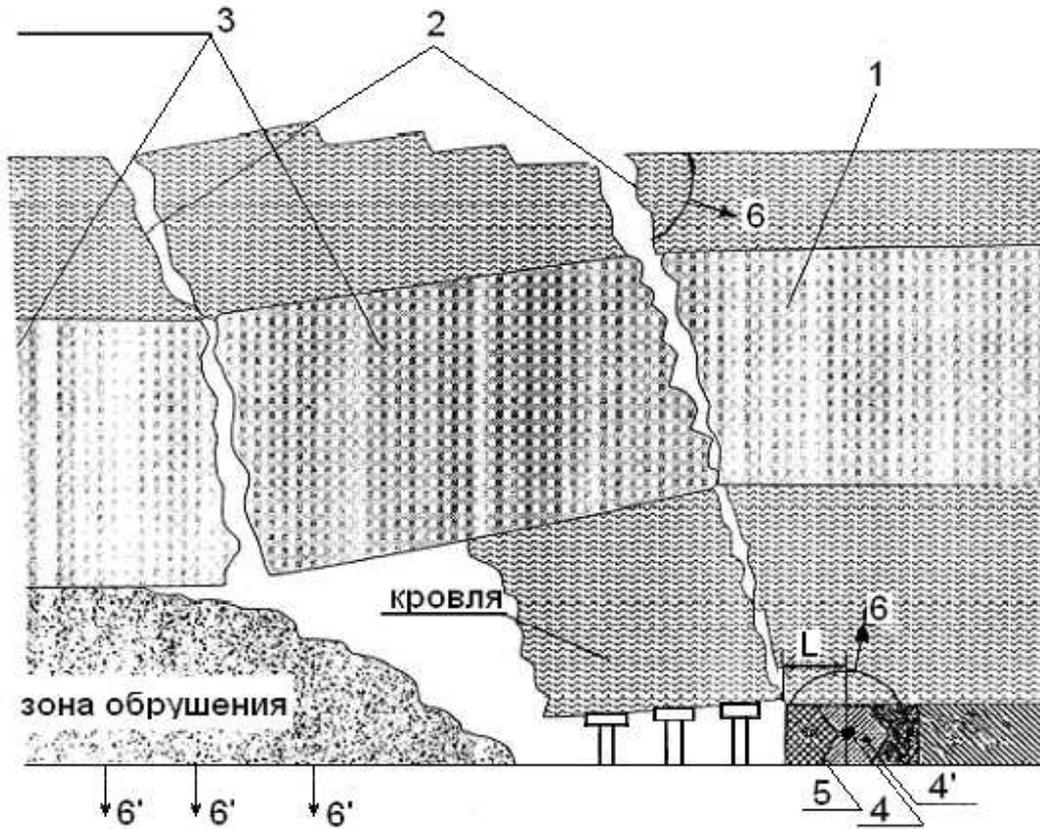


Рис. 1. Образование горных ударов линейно-протяженной конфигурации:

1 – надкровельная плита; 2 – места разлома – очаги горного удара; 3 – разломанные блоки; 4 – очаг горного удара в угольном массиве; 4' – уголь в очаге; 5 – выбрасываемый уголь вместе с углем очага; 6 – сейсмические волны квазцилиндрической конфигурации; 6' – то же, плоской;  $L$  – расстояние от линии забоя до максимума опорных напряжений

зопасности горных ударов для подземных объектов, основываясь на методике определения потенциальной упругой энергии М.Худека [1] и применении шкалы допустимых массовых скоростей, принятой в промышленной сейсмологии.

Такая комплексная методика позволит оценивать происшедшие события на основе сейсмограмм либо прогнозировать параметры и координаты зарождающихся очагов горных ударов.

## 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ УДАРОВ

В ряде работ различных авторов указывается на недостаточную научную базу при рассмотрении проблемы сейсмотехники горных ударов и необходимость использования имеющихся методических построений промышленной сейсмологии.

Для оценки энергетических параметров горного

удара воспользуемся методикой по определению удельной упругой энергии в очаге [1] на основе упругих и прочностных свойств породы. Потенциальная энергия в единице объема массива, высвобождающаяся при разрушении, состоит из суммы энергий на объемное деформирование ( $\mathfrak{E}_o^{уд.}$ ) и на пластические деформации ( $\mathfrak{E}_{пл.}^{уд.}$ ), т. е.

$$\mathfrak{E}_{общ.}^{уд.} = \mathfrak{E}_o^{уд.} + \mathfrak{E}_{пл.}^{уд.}, \quad (1)$$

$$\mathfrak{E}_o^{уд.} = \frac{1-2\nu}{6E} \sigma_{сж.}^2; \quad \mathfrak{E}_{пл.}^{уд.} = \frac{1+\nu}{3E} \sigma_{сж.}^2, \quad (2)$$

где  $E$  – модуль упругости;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\sigma_{сж.}$  – прочность породы на сжатие.

Принимаем в качестве расчетной гипотезу прочности по потенциальной энергии формоизменения, предполагающей, что критическое состояние наступает при достижении энергией формоизменения предельной величины. Она может быть найдена как разность между удельной работой, затрачиваемой на деформацию единицы объема сре-

ды ( $\mathcal{E}_{\text{общ.}}^{\text{уд.}}$ ), и удельной работой изменения объема ( $\mathcal{E}_0^{\text{уд.}}$ ), т. е.  $\mathcal{E}_{\text{общ.}}^{\text{уд.}} - \mathcal{E}_0^{\text{уд.}}$ . Согласно принятой гипотезе прочности разрушение породы происходит мгновенно и только тогда, когда напряжения достигают предела прочности.

Начальная удельная энергия в очаге принимается равной  $\mathcal{E}_{\text{пл.}}^{\text{уд.}}$ , Дж/м<sup>3</sup>.

Масштабы и энергетика горных ударов представляют серьезную опасность для подземных объектов и часто носят катастрофический характер. Поэтому прогнозная оценка их чрезвычайно важна.

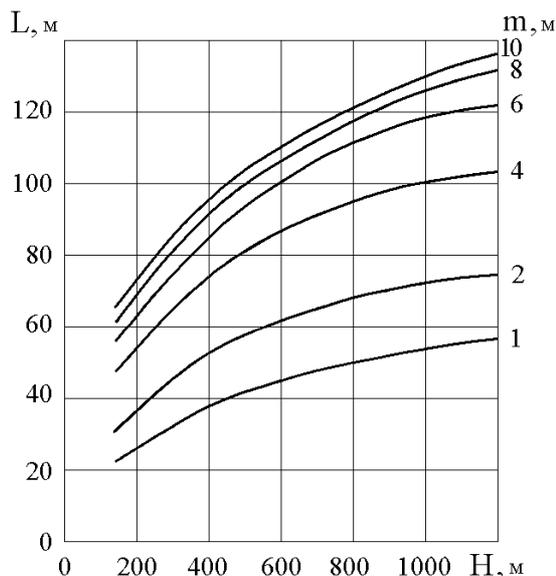


Рис. 2. График для определения протяженности зоны опорного давления  $L$  в зависимости от глубины разработки  $H$  и мощности пласта  $m$

Наиболее поддающимся прогнозированию и описанию следует считать вариант горного удара, когда разрушение происходит в горной породе со сравнительно небольшими объемами очага, конфигурация которого может быть принята как сферическая или близкая к ней. Тогда на границе очага формируется сферическая сейсмическая волна, движение которой можно описать, используя методы промышленной сейсмологии.

На рис. 1 изображена концептуальная схема образования сейсмических волн цилиндрической формы (п. 6) при разломе консольной плиты над угольным пластом и на границе очага горного удара вдоль линии забоя, а также плоской волны (п. 6') на границе толщи пласта при обрушении кровли.

Из приведенных на рис. 2 графиков для определения расстояний максимума опорного давления

$L_m$  видно, что расстояние от линии забоя до места максимума опорного давления изменяется от нескольких до 70–127 м. Таким образом, горный удар при значительной величине  $L_m$  не обязательно должен сопровождаться выбросом угля в выработанное пространство, как это изображено на рис. 1.

На рис. 3 приведена схема локального горного удара в породной надугольной толще, которую можно идентифицировать со сферической конфигурацией. Фронт сейсмической волны по отношению к оси выработки может двигаться под любым углом между прямой, проведенной от центра очага, и этой осью (от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ ). Для анализа можно ограничиться тремя основными направлениями движения волны (рис. 4): вдоль оси выработки, т. е.  $0^\circ$  (1), под углом  $45^\circ$  (2) и под углом  $90^\circ$  (3), т. е. перпендикулярно оси.

Очевидно, что последний случай при прочих равных условиях может оказаться наиболее опасным с точки зрения обрушения или повреждения боковых стенок выработки.

Чтобы воспользоваться формулой для определения плотности энергии на границе очага, из [2] необходимо взять значение максимальной массовой скорости на этой границе  $U_{max}$  и период колебания  $T$ , предполагая, что плотность  $\rho$  и скорость продольной волны  $V_p$ , как и другие характеристики породы, известны.

Радиус очага горного удара может быть найден по формулам:

$$r_u = V_s \cdot T; \quad r_u = V_p \cdot \tau_+.$$

Если известна общая сейсмическая энергия очага  $E_c^H$ , то, зная удельную сейсмическую энергию  $E_{\text{пл.}}^{\text{уд.}}$ , можно легко найти радиус очага также по формуле

$$r_u = \sqrt[3]{\frac{\mathcal{E}_c^H}{\mathcal{E}_{\text{пл.}}^{\text{уд.}} \cdot 4.19}}.$$

Результат можно сопоставить с расчетом по формуле, приведенной в [3] и применяемой в промышленной сейсмологии, и принять значение  $r_u$  более близкое к фактической величине из уже произошедших в аналогичных условиях событий.

Критическая скорость  $U_{кр.}$  в массиве, согласно [4], может быть найдена из выражения

$$U_{кр.} = \frac{\sigma_p \cdot g}{\rho V_p} \cdot \frac{1 - \mu}{\mu} \cdot 10^3,$$

где  $\sigma_p$  – временное сопротивление на разрыв.

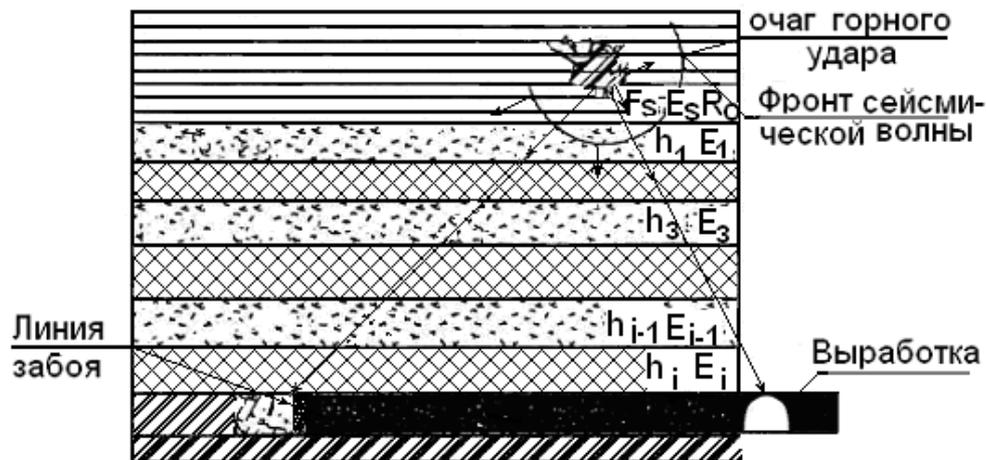


Рис. 3. Схема локального горного удара в породной надугольной толще

## 2. СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТЬ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК ПРИ ГОРНЫХ УДАРАХ

Устойчивость выработок, подверженных сейсмическому воздействию горного удара, может быть определена на основе нескольких методических подходов с возможным использованием критериев, составляющих основу промышленной сейсмологии. Здесь следует отметить следующее. Принцип оценки степени сейсмического воздействия на горные выработки может базироваться на трех концепциях:

- по энергетическому показанию для сравнения динамических явлений, происходящих в разных выработках;
- по силовым параметрам, воздействующим на стенки выработки, и сопоставлению их с предельными прочностными показателями;
- по предельным значениям массовой скорости частиц в сейсмической волне на границе выработки.

При этом энергетические, силовые и кинематические параметры сейсмических волн при уже сформировавшихся движениях изменяются по одинаковым законам как при возбуждении взрывом заряда, так и в случае излучения их горным ударом. Отличными являются лишь механизмы возникновения и движения в ближней зоне вокруг очага. Это позволяет, как уже отмечалось выше, пользоваться известными соотношениями промышленной сейсмологии в части взаимодействия сейсмических волн с поверхностью закрепленных

и незакрепленных горных выработок.

Допустимая массовая скорость зависит от типа горной выработки, ее назначения, срока службы и вида крепления.

При разработке мер по сейсмобезопасности пользуются шкалой допустимых массовых скоростей, полученных для различных классов подземных сооружений, пройденных в породах разной сейсмической активности. В качестве примера приведем одну из них (см. табл. 1) для четырех категорий горных выработок, подразделяемых по факторам ответственности и необходимой степени их сохранности.

I категория – кратковременно используемые, не содержащие магистрали;

II категория – типа хозяйственных штреков, выработок вентиляционного горизонта и др.;

III категория – выработки, содержащие магистрали, а также имеющие стационарные установки. Выработки откаточного горизонта;

IV категория – очистные незаполненные камеры, сопряжения выработок пролетом более 7 м, склады ВВ, насосные станции.

Как видим, в табл. 1 приведены данные для выработок, пройденных по породе. Однако, с известными оговорками, в ряде случаев их можно использовать при рассмотрении задачи для выработок, пройденных по углю (в частности, для выработок первой категории).

Рассмотрим методику оценки деформации выработки по энергетическому критерию воздействия сейсмической волны. Этот критерий

Табл. 1. Скорости колебаний для различных выработок, см/с

Породы, окружающие выработку и крепь	Категория выработки			
	I	II	III	IV
Скальные породы ( $f > 6$ )	160	140	110	85
Скальные нарушенные ( $f > 6$ )	60	50	40	30
Бетонная монолитная крепь	–	40	30	20
Деревянная крепь	35	30	25	15

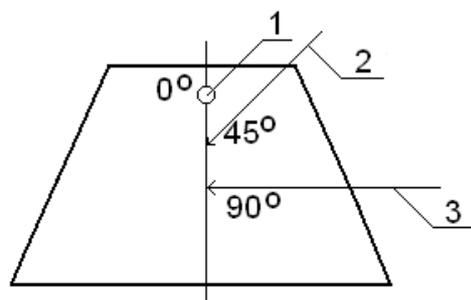


Рис. 4. Контур выработки и направление движения сейсмических волн

с наибольшей достоверностью позволяет сравнивать динамические явления, происходящие в разных выработках одного или различных месторождений, и рассчитывать крепи.

Для подготовительных выработок можно достаточно объективно производить количественную оценку интенсивности проявления горных ударов по затратам энергии на основные разрушения и деформации. Форма проявления этих факторов при креплении штреков металлической арочной податливой крепью практически во всех случаях одинакова: происходит разрушение и поднятие угля из подошвенной части (вместе с конвейером), верхняки проседают в узлах податливости, в стенках профиля у стоек крепи образуются разрывы.

Разрушение угля в подошвенной части штрека, исходя из энергетической концепции, можно представить как сдвиг по плоскости А–А<sub>1</sub>, В–В<sub>1</sub> (рис. 5, а).

Энергия, затрачиваемая на разрушение и поднятие угля:

$$\mathcal{E}_1 = \frac{Q_1^2 \cdot a}{2G_1 \cdot F_1}, \quad (\text{Дж}),$$

где  $Q_1$  – разрушающее усилие, (Н), действующее по плоскостям сдвига А – А<sub>1</sub> и В – В<sub>1</sub>, равное

$$Q_1 = 2h_1 \cdot l_1 \cdot \sigma_{\text{сдв.}},$$

(здесь  $l_1$  – длина участка проявления горного удара, (м);  $h_1$  – средняя высота поднятия почвы пла-

ста, (м) (рис. 5, а);  $\sigma_{\text{сдв.}}$  – предел прочности угля на сдвиг принимается равным 3.1 Па);  $a$  – расстояние между сдвигающимися плоскостями, (м), принимается равным ширине выработки  $l_1$ ;  $G_1$  – модуль упругости угля при сдвиге, Па,

$$G_1 = \frac{E_1}{2(1 + \mu_1)},$$

$E_1$  – модуль упругости угля при сжатии, МПа;  $\mu_1$  – коэффициент Пуассона, в [1] принимается равным 0.2, в [5] – до 0.3 (на глубине 810 м), в [5] модуль упругости угля на сдвиг принят равным  $G_1 = 250$  МПа;  $F_1$  – площадь граней, по которым действуют касательные напряжения, (м<sup>2</sup>),

$$F_1 = 2l_1 \cdot h_1.$$

Энергия  $\mathcal{E}_2$ , затрачиваемая на преодоление сил трения в узлах податливости при проседании арочной металлической крепи, определяется из соображений о характере работы в режиме заданной деформации при почти постоянном сопротивлении, равном несущей способности крепи в податливом режиме работы (для арок из спецпрофиля несущая способность СВП-27 равна 196 кН) и находится из выражения

$$\mathcal{E}_2 = n_2 Q_2 \cdot h_2, \quad (\text{Дж}), \quad (3)$$

где  $n_2$  – количество просевших рам;  $Q_2$  – несущая способность крепи в податливом режиме работы, (Н);  $h_2$  – средняя величина проседания крепи в узлах податливости, (м).

Энергия, затрачиваемая на разрыв стенок профиля в стенках крепи, имеет форму сдвига по плоскостям СС<sub>1</sub> и ДД<sub>1</sub> (рис. 5, б), но она составляет менее одного процента в суммарной энергии деформаций выработки как следствие сейсмического влияния, поэтому может не приниматься в практических расчетах, хотя ее нахождение не представляет сложности при известных механических параметрах крепи (предел прочности стали на срез, модуль упругости и коэффициент Пуассона стали).

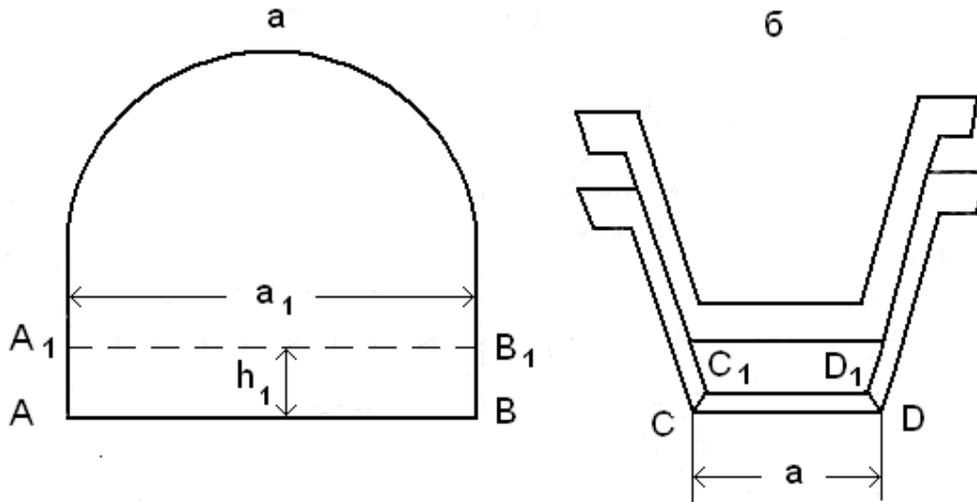


Рис. 5. Схема динамического воздействия горного удара на подземную выработку, пройденную по углю: *a* – сечение выработки; *б* – сечение арочной податливой крепи СВП;  $a_1$  – ширина выработки;  $h_1$  – средняя высота поднятия почвы пласта с положения АВ до положения  $A_1B_1$ ;  $CC_1$ ,  $DD_1$  – плоскости сдвига профиля СВП в стойке арочной крепи

В работе [5] упоминается также о затратах энергии на перемещение конвейера, однако они незначительны (сотые доли процента) и могут не учитываться.

Таким образом, основная сейсмическая энергия горного удара реализуется в виде деформаций разрушения и поднятия угля в почве выработки  $\mathcal{E}_1$  и преодоления сопротивления в узлах податливой крепи  $\mathcal{E}_2$ .

В качестве примера на рис. 6 приведем результаты анализа последствий горных ударов на одной из шахт Шурабского месторождения (Россия) на глубине 810 м, исходя из вышеизложенной энергетической концепции. Суммарная энергия, затрачиваемая на все виды деформаций, изменялась от  $1 \cdot 10^5$  до  $1 \cdot 10^7$  Дж (рис. 6, а) и реализовывалась на участках выработки протяженностью от 5 до 100 м. При этом высота поднятия подошвенной части выработки изменялась от 0.1 до 0.75 м, проседание элементов крепи в замках составляло 0.05 – 0.3 м.

Как видно из рис. 6, а, динамические явления в выработках шахты могут быть разбиты на три группы, различающиеся по интенсивности проявления по общим затратам энергии на отдельное событие, и на две группы, различающиеся по интенсивности проявления по удельным энергетическим затратам на 1 пог. м выработки (рис. 6, б). Из последних показателей можно получить плотность сейсмической энергии  $\mathcal{E}_s$  на любом расстоянии  $r$  от очага:

$$\mathcal{E}_s = 0.625\rho V_p \cdot U_{\max}^2 \cdot T, \quad (\text{Дж/м}^2). \quad (4)$$

Учитывая эффект отражения на контуре выработки ( $K=2$ ) и исходя из допущения о том, что на границе очага значение  $U_{\max}$  не может превышать  $U_{\text{кр}}$ , при котором заканчиваются необратимые деформации (разрушения), а необратимые деформации (разрушения) выработки возможны также лишь при наличии удельной критической энергии, можно предположить, что опасными энергетическими уровнями на контуре выработки будут те, которые составляют не менее половины начальных (на границе очага) значений.

Таким образом, если принимать крайние значения параметров горных ударов на контурах выработок в соответствии с рис. 6, будем иметь: при уровне энергии  $10^5$  Дж, принимая длину участка 5 м, удельную энергию для этого случая получим равной  $2 \cdot 10^4$  Дж/пог.м, а при энергии  $10^7$  Дж и длине деформированного участка 100 м –  $1 \cdot 10^5$  Дж/пог. м, т.е. в 5 раз больше.

Таким образом можно установить энергетический баланс между энергией сейсмической волны и прочностными характеристиками крепи выработки при взаимодействии сейсмической волны (выражаемой через плотность энергии в Дж/м<sup>2</sup>) с выработкой и, решая обратную задачу (зная уровень энергии, затраченной на деформацию и расстояние от очага), можно по формуле, согласно [2], определить плотность сейсмической энергии на границе очага, приняв текущее значение  $\mathcal{E}_s$ , рав-

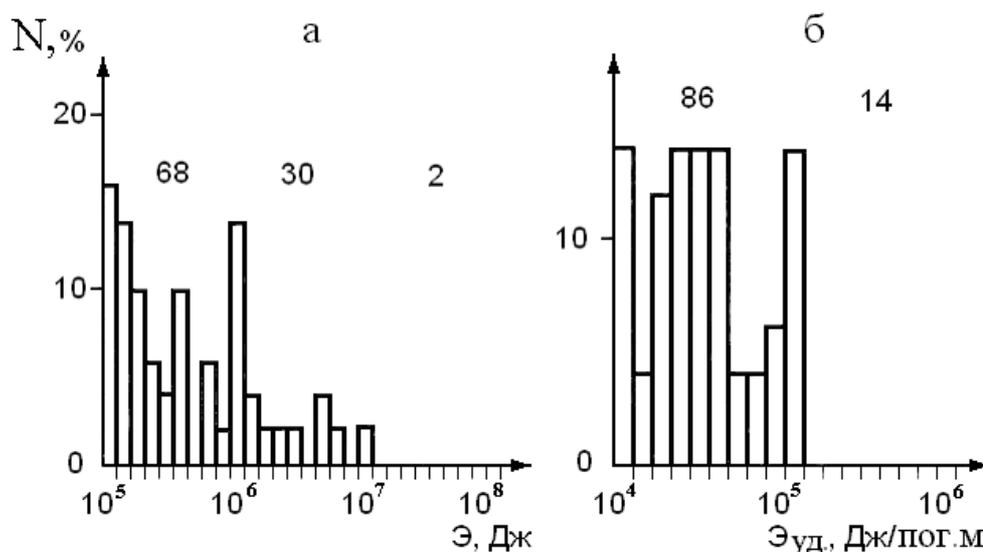


Рис. 6. Статистическая диаграмма динамических явлений в подготовительных выработках на шахте N3 Шурабского месторождения (Россия) по энергетическому показателю ( $N$  – количество горных ударов рассматриваемой интенсивности):

*а* – данные по общей энергии; *б* – данные по удельной энергии, Дж/пог. м

ное плотности энергии на контуре выработки, т. е.

$$\Theta_{оч.} = \frac{\Theta_s^r \cdot r^{3.2}}{1.75 \cdot 10^6}.$$

Затем, приняв определенный процент сейсмической энергии от полной энергии горного удара, можно найти значение последней, а, зная удельную энергию разрушения, – вычислить объем очага горного удара и его радиус.

В заключение рассмотрим возможность анализа последствий горного удара, исходя из силовой концепции, использовав подходы, принятые в промышленной сейсмике.

Начальное напряжение на фронте сейсмической волны на границе очага горного удара логично принять равным временному сопротивлению породы на сжатие  $\sigma_{сж.}$  или рассчитать его по следующей формуле [6]:

$$\sigma_n = 0.64 f^2 \rho \frac{V_s}{V_p}. \quad (5)$$

При рассмотрении деформации закрепленных горных выработок по аналогии с методическими подходами при энергетической концепции будем считать, что разрушение угля в почве будет иметь место, если текущее напряжение на фронте волны  $\sigma_r$  больше или равно временному сопротивлению

угля на растяжение, а кинетическая энергия движения разрушенного угля будет сопоставима с несущей способностью крепи в податливом режиме ( $Q_2$ ) согласно формуле (3).

Дальнейший ход решений зависит от того, какими исходными данными мы располагаем (параметры породы, энергия очага или энергия на контуре выработки, расстояние от очага), т. е. какие показатели нам известны, а какие следует определять. При этом во всех рассмотренных нами вариантах фронт сейсмической волны у выработки мы принимаем плоским (квазиплоским), в то время как на границе очага он может быть либо сферическим, либо цилиндрическим.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При исследовании параметров сейсмических волн, вызванных горными ударами, принципиально возможно использовать закономерности движения сейсмозрывных волн, приведя геометрические параметры очагов горных ударов к одной из канонических форм (плоскость, цилиндр, сфера).

2. Главным отличием при этом является методика определения начальных и энергетических параметров сейсмической волны на границе очага возбуждения (радиуса излучателя), т.е. радиуса ра-

зрушення при возбуждении сейсмозрывных волн и радиуса очага при горном ударе.

3. Удельная потенциальная энергия очага горного удара может быть определена по методике [1]. Зная закон изменения плотности сейсмической энергии с расстоянием (4) от максимума на границе очага до точки наблюдения, можно получить значение максимальной массовой скорости на контуре выработки и сравнить ее с допустимыми при сейсмозрывных нагрузках для различных выработок согласно табл. 1.

4. Оценка последствий горного удара может быть произведена, исходя из силовой концепции, приняв начальное напряжение на фронте волны по формуле (5). Зная закон падения напряжения с расстоянием, можно определить его значение на контуре выработки и сопоставить с допустимым для конкретных условий.

1. Chudek M. Geomechanika.– Gliwice: Wyd Politechniki Slaskiej, 2002.– 637 p.
2. Chudek M., Wowk O. A., Kuzmenko A. A. O propagacji energii sejsmicznej przy procesach dynamicznych // Zeszyty naukowe politechniki Slaskiej.– 2004.– Seria: Gornictwo, 2258.– P. 59–69.
3. Мосинев В. Н., Богацкий В. Ф Основные научно-технические проблемы сейсмоки ближней зоны // Взрывное дело 85/42. “Сейсмика промышленных взрывов”.– М.: Недра, 1983.– С. 89–101.
4. Штейнбах Н. А., Волчанская В. А Оценка действия направленных взрывов на сохранность скального массива и сооружений // Взрывное дело 85/42. “Сейсмика промышленных взрывов”.– М.: Недра, 1983.– С. 238–242.
5. Макаров Ю. П К оценке интенсивности проявления горных ударов в подготовительных выработках // ФТПРПИ.– 1983.– N 3.– С. 97–98.
6. Вовк О. А. Взрывные методы создания сейсмозащитных экранов // Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”: серія “Гірництво”: Збірник наукових праць.–К. НТУУ “КПІ”, ЗАТ “Техновибух”.– 2002.– 7.– С. 99–107.