

ЗАВИСИМОСТЬ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРЕЩИНОВАТОГО МАССИВА ОТ ИНТЕРВАЛА ЗАМЕДЛЕНИЯ В ЗОНЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ

В.Н. Тюпин¹, В.В. Хаустов¹

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, Россия, e-mail: tyupinvn@mail.ru

Аннотация: Экспериментальные исследования указывают на то, что при проведении массовых взрывов на карьерах с увеличением интервала замедления скорость колебаний от сейсмического действия взрыва в районе охраняемого объекта как правило уменьшается. Однако сейсмически безопасный интервал замедления зависит от горно-геологических условий, которые существенно меняются в пределах карьерного поля, а также от горнотехнических параметров. Целью настоящей статьи является получение теоретических формул расчета скорости колебаний, сжимающих напряжений и относительных деформаций горного массива в зависимости от интервала замедления на основе разработки механизма формирования сейсмозрывных волн при короткозамедленном взрывании в трещиноватых массивах горных пород, доказательство правомерности формул. Анализ литературных источников позволил разработать механизм формирования сейсмозрывных волн в трещиноватых горных массивах, согласно которому высокоскоростное соударение раздробленных и нераздробленных отдельностей в массиве под действием давления продуктов детонации создает упругие сейсмозрывные волны. Теоретические исследования дали возможность получить формулы для определения скорости колебаний массива, сжимающих напряжений и относительных деформаций в зоне сейсмического действия взрыва в зависимости от интервала замедления. Путем математического, численного анализа и сравнения результатов с данными практики доказана правомерность формулы определения скорости колебаний массива в зависимости от интервала замедления. Приведенные зависимости являются основой для разработки элементов правил ведения взрывных работ с целью минимального воздействия сейсмозрывных волн на охраняемые объекты в различных горно-геологических и горнотехнических условиях.

Ключевые слова: массовые взрывы, сейсмическое действие, интервал замедления, механизм формирования сейсмозрывных волн, математические формулы, скорость колебаний, сжимающие напряжения и относительные деформации, правомерность.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант № 075-03-2020-474/1 от 05.03.2020).

Для цитирования: Тюпин В. Н., Хаустов В. В. Зависимость геомеханического состояния трещиноватого массива от интервала замедления в зоне сейсмического действия массовых взрывов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2. – С. 45–54. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-45-54.

Geomechanical behavior of jointed rock mass versus delay interval in seismic load zone of large-scale blasts

V.N. Tyupin¹, V.V. Khaustov¹

¹ Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia, e-mail: tyupinvn@mail.ru

Abstract: Experimental tests show that velocities of seismic vibrations from quarry blasts generally lower as delay intervals between large-scale blasts are increased. At the same time, a seismically safe delay interval is governed by geological conditions, which vary appreciably within an open pit mine field, and by geotechnical conditions of mining. This study was aimed to obtain theoretical formulas of vibration velocities, compressive stresses and relative strains in rock mass as functions of the delay interval based on the mechanism of seismic waves induced by short-delayed blasting in jointed rock mass. These formulas were to be justified. After review of reference sources, the mechanism of blast-induced seismic waves in jointed rock mass was developed. According to this mechanism, high-velocity collisions of fractured and intact blocks under the action of pressure from detonation products generate elastic waves. The theoretical research allowed formulas for the delay interval dependence of the vibration velocities, compressive stresses and strain rates in rock mass in the seismic impact zone of blasting. The comparison of the mathematical and numerical analysis results with the actual practice data validates the formulas of vibration velocities as function of blast-to-blast delay intervals. These formulas make a framework for the development of regulations for blasting at minimized seismic impact on guarded objects in different geological and geotechnical conditions.

Key words: large-scale blasts, seismic load, delay interval, blast-induced seismic wave interval, mathematical formulas, vibration velocity, compressive stress, strain rates, justification.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Grant No. 075-03-2020-474/1 or 05.03.2020.

For citation: Tyupin V.N., Khaustov V.V. Geomechanical behavior of jointed rock mass versus delay interval in seismic load zone of large-scale blasts. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(2):45-54. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-45-54.

Введение

Большое количество теоретических работ и промышленных экспериментальных наблюдений, проводимых российскими и зарубежными учеными [1–15], посвящено исследованию сейсмического действия взрыва. В работах [7, 13–15] приводятся сведения о влиянии интервала замедления между взрывом групп зарядов ВВ на скорость колебаний массива в основании охраняемых объектов. В [7] экспериментально установлено резкое снижение скорости смещения лессовых грунтов (с 1,0 до 0,2 см/с)

при увеличении интервала замедления до 60 мс, а затем ее незначительное увеличение (до 0,4–0,6 см/с) при увеличении интервала замедления до 140 мс. В [13–14] также экспериментально при ведении взрывных работ (ВР) в известковых карьерах установлено снижение скорости колебаний массива в основании опор ЛЭП с 1,2 до 0,5 мм/с при увеличении интервала замедления с 25 до 110 мс. В [15] на основе теоретических исследований даны рекомендации по увеличению интервала замедления до 60 мс и более с целью защиты под-

земных выработок от разрушения при ведении ВР на угольных разрезах.

Однако данные исследования являются в основном экспериментальными, полученными в определенных горно-геологических условиях. Но, как указано в [3–5, 7], сейсмически безопасный интервал замедления зависит от горно-геологических условий, которые существенно меняются в пределах карьерного поля [16] и горнотехнических параметров.

Целью настоящей статьи является разработка механизма формирования сейсмозрывных волн при короткозамедленном взрывании в трещиноватых массивах горных пород, получение теоретических формул расчета скорости колебаний, сжимающих напряжений и относительных деформаций горного массива в зависимости от интервала замедления, доказательство правомерности формул.

Методы

Использован анализ технической литературы для разработки механизма формирования сейсмозрывных волн, проведены теоретические исследования, численные расчеты и сравнение результатов с данными практики. Доказана правомерность расчетов скорости колебаний массива в зависимости от интервала замедления.

Механизм формирования сейсмозрывных волн

Для решения вопроса по установлению влияния интервала замедления на интенсивность сейсмического действия взрыва необходимо разработать механизм формирования сейсмозрывных волн.

М.А. Садовский считает, что горная порода — это сложная блочно-иерархическая система, в которой некоторые из составляющих ее блоков в силу ряда

причин (землетрясение, взрыв) находятся в состоянии энергообмена с окружающим массивом горных пород. Совокупность этих блоков названа им «сейсмический очаг» [1]. В работе [2] указано на то, что при подземном взрыве формируется котловая полость и зона разрушения, то есть зоны неупругого деформирования горного массива, которые и являются источником сейсмозрывных волн.

В работах [17, 18] разработан механизм и математические модели при взрывании в трещиноватом массиве горных пород, согласно которым волна напряжений дробит отдельности, пронизанные зарядом ВВ, а квазистатическое давление продуктов детонации приводит к радиальному смещению раздробленных и нераздробленных отдельностей в массиве. В результате образуются зоны дробления, трещинно-блочных и трещинных деформаций. При этом в [17] высказано предположение, что сейсмическое действие взрыва вызвано высокоскоростным соударением отдельностей в зоне дробления и трещинно-блочных деформаций.

На основе приведенных исследований механизм формирования сейсмозрывных волн в трещиноватом горном массиве можно представить следующим образом. При взрыве группы зарядов ВВ в трещиноватом массиве горных пород в первый момент времени волны напряжений разрушают отдельности, пронизанные зарядами ВВ и, как правило, теряют свою энергию на ближайших естественных трещинах. Потеря энергии волнами напряжений на трещинах шириной 2–8 мм экспериментально установлена в работах Л.И. Барона, Н.П. Сеинова, А.Н. Ханукаева [18]. Фактическая ширина раскрытия естественных трещин в горных массивах на карьерах составляет 5–20 мм [3, 17, 18, 20]. Далее, под действием давления продуктов де-

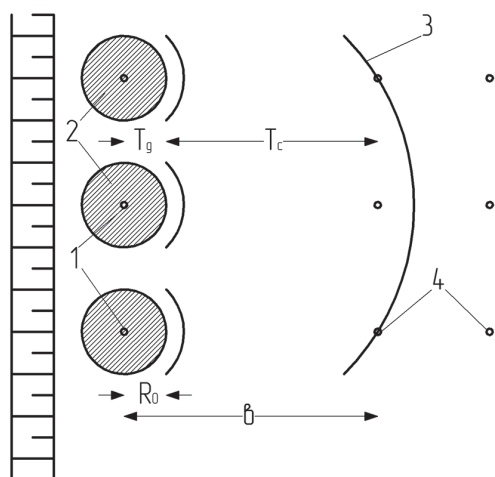


Схема к определению времени достижения сейсмозрывной волны второй группы зарядов ВВ: 1 – взорванные заряды; 2 – очаги сейсмозрывных волн; 3 – сейсмозрывная волна; 4 – заряды ВВ второй группы

Scheme for determining the time to reach the seismic blast wave of the second group of explosive charges: 1 – blown up charges; 2 – foci of seismic blast waves; 3 – seismic blast wave; 4 – explosive charges of the second group

тонации происходит смещение раздробленных отдельных в радиальном направлении и их высокоскоростное соударение с неподвижными отдельностями, которые, как правило, разрушаются. Таким образом, вблизи взорванных зарядов ВВ образуется зона раздавливания (мелкозернистого дробления), в которой формируются максимальные сжимающие напряжения и максимальная скорость смещения раздробленных отдельных. То есть вблизи взрываемых скважин в массиве горных пород формируется очаг, из которого за счет высокоскоростного соударения (радиального деформирования и смещения) отдельных в трещиноватом горном массиве распространяются сейсмозрывные волны. Процесс деформирования и смещения массива можно называть распространением волны деформаций.

Установление формул расчета скорости колебаний, сжимающих напряжений и относительных деформаций горного массива

Для обеспечения минимального сейсмического воздействия взрыв второй группы зарядов ВВ 4 необходимо производить после того, как волна деформаций достигнет внешней границы очага 2, откуда излучаются упругие сейсмозрывные волны, которые затем достигают места расположения второй группы зарядов ВВ 4 и удаляются от него (рисунок).

То есть, при последовательном взрывании двух групп зарядов ВВ интервал замедления между их взрыванием, обеспечивающий минимальную интерференцию (наложение) сейсмозрывных волн от двух групп зарядов ВВ, должен удовлетворять условию

$$\tau \geq T_d + T_c, \quad (1)$$

где T_d – время достижения волны деформаций (фронта соударения отдельных) границы очага; T_c – время прохождения сейсмозрывной (продольной) волны от границы очага до второй группы зарядов ВВ.

Следует сразу отметить, что согласно исследованиям [18] скорость волны деформаций (радиального смещения отдельных) при взрыве одной скважины диаметром 0,25 м на расстоянии 1 м составляет 37,2 м/с, на расстоянии 5 м – 9,3 м/с. При взрыве группы из трех зарядов ВВ скорость смещения отдельных на расстоянии 1 и 5 м составляет соответственно 63,2 м/с и 15,8 м/с. Эти расчетные данные подтверждаются результатами скоростной киносъемки разлета отдельных из откоса уступа, где скорость составляет 5,4–27,0 м/с [19].

Согласно [18] время достижения волны деформаций заданной точки массива (R_0) или величину T_d при взрыве группы зарядов ВВ можно определить по формуле

$$T_0 = \frac{8R_0^2 \rho \Phi^{0.5}}{\sqrt{\pi} D \rho_B d_3 \left(1 - \frac{\mu v}{1-v}\right) \ln\left(\frac{2R_0}{d_3}\right) K_1 K_2 K_3 K_4} \quad (2)$$

где R_0 — радиус зоны раздавливания массива — радиус очага; ρ — объемная масса горного массива; Φ — показатель трещиноватости; D , ρ_B , d_3 — скорость детонации, плотность заряжения, диаметр заряда ВВ; μ — коэффициент трения между отдельностями; v — коэффициент Пуассона; K_1 , K_2 — показатели, учитывающие взаимодействие одновременно взрываваемых зарядов ВВ и при короткозамедленном взрывании групп зарядов; K_3 , K_4 — показатели, учитывающие наличие открытых поверхностей и длину заряда ВВ соответственно.

$$K_1 = \ln 2,7 [n - \mu(n-1)];$$

$$K_2 = \ln(1,7N + 1);$$

$$K_3 = \left(1 - \sum_{i=1}^z \frac{a_i (n_i^* - 1)}{2\pi W_i}\right)^{0.5};$$

$$K_4 = \ln 2,7 \left[\frac{l_3}{d_e} - 2\mu \left(\frac{l_3}{d_e} - 1 \right) \right] \quad (3)$$

где n — число зарядов ВВ в одновременно взрываваемой группе; N — число рядов скважин; a_i — расстояние между скважинами в ряду; n_i^* — число скважин, взаимодействующих при их одновременном взрыве; W_i — ЛНС; z — число открытых поверхностей вблизи взрываемой группы зарядов ВВ, — длина заряда ВВ в скважине, d_e — размер отдельности во взрываемом массиве.

Геометрические параметры очага (зоны раздавливания) определены из закона сохранения энергии, согласно которому кинетическая энергия разлетающихся частей отдельностей расходуется на упругопластические деформации окружающего трещиноватого массива. Радиус очага (зоны раздавливания) определен

при условии: действующее сжимающее напряжение равно пределу прочности породы на сжатие и имеет вид [18]

$$R_0 = \frac{\sqrt{\pi} D \rho_B d_3 c}{8 \sigma_{сж} \Phi} \cdot \left(1 - \frac{\mu v}{1-v}\right) K_1 K_2 K_3 K_4, \quad (4)$$

где c — скорость продольной волны в породе; $\sigma_{сж}$ — предел прочности породы на сжатие.

Формулу (4) можно упростить, заменив отдельные составляющие цифрами и условившись, что $\sigma_{сж} = 15 \cdot 10^6 f$. Тогда

$$R_0 = 1,25 \cdot 10^{-8} \frac{D \rho_B d_3 c}{f \Phi} K_1 K_2 K_3 K_4, \quad (5)$$

Подставляя (4) в (2) и численно упрощая полученную зависимость, имеем

$$T_0 = \frac{D \rho_B d_3 E}{10 \sigma_{сж}^2 \Phi^{1.5}} K_1 K_2 K_3 K_4, \quad (6)$$

где E — модуль упругости горной породы, $E = \rho c^2$.

Величину T_c можно определить по формуле

$$T_c = \frac{b - R_0}{c_m}, \quad (7)$$

где b — расстояние между группами короткозамедленно взрываваемых скважин; c_m — скорость продольной волны в массиве.

Анализ зависимости (1) с учетом (6) и (7) указывает на то, что интервал замедления, обеспечивающий минимальное сейсмическое воздействие на окружающие объекты, зависит как от физико-технических свойств массива, так и от детонационных характеристик ВВ и параметров массового взрыва. Интервал замедления необходимо увеличивать с увеличением скорости детонации, плотности заряжения, диаметра заряда ВВ, длины заряда, числа зарядов в одновременно взрываваемой группе, числа групп зарядов ВВ в блоке, а также ЛНС. При повышении прочности горной породы и степени трещиноватости горного массива

ва интервал замедления можно уменьшать.

Определим численные значения величин по формулам (5), (6), (7) при: $D = 3,6 \cdot 10^3$ м/с; $\rho_B = 0,85 \cdot 10^3$ кг/м³; $d_3 = 0,25$ м; $c = 5 \cdot 10^3$ м/с; $f = 10$; $\Phi = 8$; $K_1 = 1,7$ ($\mu = 0,45$; $n = 3$); $K_2 = 1$ ($N = 1$); $K_3 = 0,45$ (две открытые поверхности); $K_4 = 1,9$ ($l_3 = 8$ м; $d = 0,5$ м); $E = 6,25 \cdot 10^{10}$ Па; $\sigma_{сж} = 10^8$ Па. Расчеты по (5) дают $R_o = 0,87$ м; по (6) $T_d = 21 \cdot 10^{-3}$ с. Расчеты по (7) при $b = 6$ м и $c_m = 3,5 \cdot 10^3$ м/с дают $T_c = 1,5 \cdot 10^{-3}$ с.

Численный анализ показывает, что вторым членом в (1) можно пренебречь. Тогда интервал замедления, обеспечивающий минимальную интерференцию сейсмозрывных волн при короткозамедленном взрывании групп зарядов ВВ, равен

$$\tau \geq T_d. \quad (8)$$

Весьма важно определить скорость колебаний массива горных пород в зависимости от интервала замедления. Известно, что скорость смещения отдельных массива (скорость волны деформаций) при короткозамедленном взрывании групп зарядов ВВ имеет вид [18]

$$v(R) = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \frac{D\rho_B d_3}{R\rho\Phi^{0,5}} \left(1 - \frac{\mu v}{1-v}\right) K_1 K_2 K_3 K_4, \quad (9)$$

где R — расстояние от места взрыва группы зарядов ВВ.

Если в (2) вместо

$$\sqrt{\pi} D\rho_B d_3 \left(1 - \frac{\mu v}{1-v}\right) K_1 K_2 K_3 K_4 (8\rho\Phi^{0,5})^{-1}$$

подставить $v(R)R$ (соотношение получено из (9)), то установим зависимость скорости колебаний массива с расстоянием (R) и в зависимости от интервала замедления ($\tau = T_d$) в виде

$$v(R) = \frac{R_o^2}{R\tau \ln\left(\frac{2R_o}{d_3}\right)}. \quad (10)$$

Анализ зависимости (10) с учетом (4) и (5) указывает, что с увеличением скорости детонации, плотности заряжения, диаметра заряда ВВ и показателей усиления действия взрыва скорость колебаний массива повышается. С увеличением степени нарушенности массива (Φ), расстояния от взрыва (R) и интервала замедления (τ) между группами зарядов $v(R)$ уменьшается. Кроме того, в показатель K_3 входит величина ЛНС, с увеличением которой скорость колебаний увеличивается. Данный анализ указывает на правомерность формулы (10), так как не противоречит исследованиям [3, 4, 7, 13–15].

Другими важными параметрами геомеханического состояния горного массива являются сжимающее напряжение $\sigma(R)$ и относительные деформации $\varepsilon(R)$, которые можно определить по формулам

$$\sigma(R) = v(R) \frac{\rho_2 c_2}{\Phi_2^{0,5}} = \frac{R_o^2 \rho_2 c_2}{R\tau \ln\left(\frac{2R_o}{d_3}\right) \Phi_2^{0,5}}, \quad (11)$$

где ρ_2 , c_2 — соответственно объемная масса и скорость продольной волны в горной породе в районе охраняемого объекта; Φ_2 — показатель трещиноватости горного массива в районе охраняемого объекта.

Величину относительных деформаций массива в районе охраняемого объекта можно определить по формуле

$$\varepsilon(R) = \frac{\sigma(R)}{\rho_2 c_2^2} \Phi_2 = \frac{R_o^2 \Phi_2^{0,5}}{R\tau \ln\left(\frac{2R_o}{d_3}\right) c_2}. \quad (12)$$

Численные расчеты, доказательство правомерности

Определим численно изменение скорости колебаний, сжимающих напряжений и относительных деформаций горного массива с увеличением интер-

Зависимость скорости колебаний массива, напряжений

и относительных деформаций от интервала замедления при $R_0 = 0,87$ м, $R = 500$ м

Dependence of the oscillation velocity of the array, stresses and relative deformations on the deceleration interval at $R_0 = 0.87$ m, $R = 500$ m

$\tau, 10^{-3}, \text{ с}$	1	10	20	50	75	100
$v(R), 10^{-2}, \text{ м/с}$	78	7,8	3,9	1,6	1,0	0,8
$\sigma(R), 10^6, \text{ Па}$	3,6	0,36	0,18	0,074	0,046	0,037
$\varepsilon(R), 10^{-5}$	43,7	4,37	2,18	0,89	0,56	0,45

вала замедления между группами зарядов ВВ (τ) по формулам (10) – (12) при $R = 500$ м, $R_0 = 0,87$ м, $c_2 = 5 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_2 = 2,6 \cdot 10^3$ кг/м³ и других значениях приведенных ранее. Результаты расчетов приведены в таблице.

Анализ результатов расчетов скорости колебаний массива в зависимости от интервала замедления и сопоставление их с исследованиями [7, 13 – 15] говорит о правомерности формулы (10).

Кроме того, экспериментальные данные [7] показывают, что скорость колебаний массива при КЗВ уменьшается при увеличении интервала замедления до 60 мс, а затем увеличивается при $\tau = 80 – 140$ мс. Это заложено в формуле (10) с учетом (4). В (4) радиус очага R_0 зависит от показателя трещиноватости Φ , который уменьшается, если волна деформаций достигает последующую группу зарядов ВВ до ее взрыва, что экспериментально доказано в [20].

Кроме того, в [7] экспериментально доказано, что с увеличением линии наименьшего сопротивления (W) скорость колебаний увеличивается. Это заложено в показателе K_3 (3), который входит в R_0 . С увеличением W в (3) K_3 увеличивается и, соответственно, увеличивается $v(R)$.

Заключение

По результатам анализа литературных источников, теоретических исследований, численных расчетов и сравнения их с данными практики сделано следующее:

1. Предложен механизм формирования сейсмозрывных волн в трещиноватых горных массивах, согласно которому высокоскоростное соударение раздробленных и нераздробленных отдельных частей в массиве под действием давления продуктов детонации создает упругие сейсмозрывные волны.

2. Получены формулы для определения скорости колебаний массива, сжимающих напряжений и относительных деформаций в зоне сейсмического действия взрыва в зависимости от интервала замедления.

3. Путем математического и численного анализа доказана правомерность формулы определения скорости колебаний массива в зависимости от интервала замедления.

4. Приведенные зависимости являются основой для разработки элементов правил ведения взрывных работ с целью минимального воздействия сейсмозрывных волн на охраняемые объекты в различных горно-геологических и горнотехнических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садовский М. А. Сейсмика взрывов и сейсмология // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1987. – № 11. – С. 34–42.
2. Адушкин В. В., Спивак А. А. Подземные взрывы. – М.: Наука, 2007. – 579 с.

3. Мосинец В. Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. — М.: Недра, 1976. — 270 с.

4. Кутузов Б. Н. Безопасность взрывных работ в горном деле и промышленности: учебное пособие. — М.: Изд-во «Горная книга», Изд. МГГУ, 2009. — 670 с.

5. Совмен В. К., Кутузов Б. Н., Марьясов А. Л., Эквист Б. В., Токаренко А. В. Сейсмическая безопасность при взрывных работах: Учебное пособие. — М.: Изд-во «Горная книга», 2002. — 228 с.

6. Господариков А. П., Зацепин М. А. Математическое моделирование нелинейных краевых задач геомеханики // Горный журнал. — 2019. — № 12. — С. 16–20. DOI: 10.17580/gzh.2019.12.03.

7. Цейтлин Я. И., Смолий Н. И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов. — М.: Недра, 1981. — 192 с.

8. Цибаев С. С., Ренев А. А., Позолотин А. С., Мефодьев С. Н. Оценка влияния динамических сейсмических воздействий на устойчивость подземных горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 2. — С. 101–111. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-101-111.

9. Segarra P., Sanchidrián J. A., Castedo R., López L. M., Del Castillo I. Performance of some coupling methods for blast vibration monitoring // Journal of Applied Geophysics. 2015. Vol. 112. Pp. 129–135.

10. Kumar R., Choudhury D., Bhargava K. Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2016. Vol. 8. No 3. Pp. 341–349. DOI: 10.1016/j.jrmge.2015.10.009.

11. Gui Y. L., Zhao Z. Y., Jayasinghe L. B., Zhou H. Y., Goh A. T. C., Tao M. Blast wave induced spatial variation of ground vibration considering field geological conditions // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018. Vol. 101. Pp. 63–68. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.11.016.

12. Li J. C., Li N. N., Chai S. B., Li H. B. Analytical study of ground motion caused by seismic wave propagation across faulted rock masses // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2017. Vol. 42. No 1. Pp. 95–109. DOI: 10.1002/nag.2716.

13. Бульбашева И. А. Управление сейсмическим воздействием взрывов на опоры ЛЭП при открытой разработке месторождений. Автореф. дис. канд. техн. наук, специальность 25.00.20. — СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2019. — 19 с.

14. Коршунов Г. И., Бульбашева И. А., Афанасьев П. И. Исследование сейсмического воздействия на линии электропередач при ведении взрывных работ // Безопасность труда в промышленности. — 2019. — № 4. — С. 39–43.

15. Зыков В. С., Иванов В. В., Соболев В. В. Исследование влияния массовых промышленных взрывов на устойчивость подземных горных выработок при открыто-подземной разработке угольных месторождений // Безопасность труда в промышленности. — 2018. — № 11. — С. 19–23.

16. Игнатенко И. М., Яницкий Е. Б., Дунаев В. А., Кабелко С. Г. Трещиноватость породного массива в карьере рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК» // Горный журнал. — 2019. — № 10. — С. 11–15.

17. Кутузов Б. Н., Тюпин В. Н. Определение размеров зон деформирования трещиноватого массива взрывом заряда ВВ // Известия вузов. Горный журнал. — 1983. — № 4. — С. 53–58.

18. Тюпин В. Н. Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах. — Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 2017. — 192 с.

19. Ткачук К. М., Ткачев С. И. Исследование действия взрыва колонкового заряда с использованием скоростной киносъемки // Известия вузов. Горный журнал. — 1966. — № 4. — С. 73–76.

20. Тюпин В. Н. Эффективность дробления горных пород взрывом при предварительном закрытии макротрещин // Горный журнал. — 1978. — № 9. — С. 41–44. **ПЛАТ**

REFERENCES

1. Sadovsky M.A. Seismic of explosions and seismology. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli*. 1987, no 11, pp. 34–42. [In Russ].
2. Adushkin V.V., Spivak A.A. *Podzemnye vzryvy* [Underground explosions], Moscow, Nauka, 2007, 579 p.
3. Mosinets V.N. *Drobnyashchee i seismicheskoe deystvie vzryva v gornykh porodakh* [Crushing and seismic action of an explosion in rocks], Moscow, Nedra, 1976, 270 p.
4. Kutuzov B.N. *Bezopasnost' vzryvnykh rabot v gornom dele i promyshlennosti: uchebnoe posobie* [Safety of blasting in mining and industry. Educational aid], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», Izd. MGGU, 2009, 670 p.
5. Sovmen V.K., Kutuzov B.N., Mar'yasov A.L., Ekvist B.V., Tokarenko A.V. *Seismicheskaya bezopasnost' pri vzryvnykh rabotakh: Uchebnoe posobie* [Seismic safety during blasting. Educational aid], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2002, 228 p.
6. Gospodarikov A.P., Zatsepin M.A. Mathematical modeling of nonlinear boundary value problems of geomechanics. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no 12, pp. 16–20. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.12.03.
7. Tseytlin Ya.I., Smolii N.I. *Seismicheskie i udarnye vozduzhnye volny promyshlennykh vzryvov* [Seismic and shock air waves of industrial explosions], Moscow, Nedra, 1981, 192 p.
8. Tsibaev S.S., Renev A.A., Pozolotin A.S., Mefodiev S.N. Assessment of seismic impacts on stability of openings in underground mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no 2, pp. 101–111. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-101-111.
9. Segarra P., Sanchidrián J.A., Castedo R., López L.M., Del Castillo I. Performance of some coupling methods for blast vibration monitoring. *Journal of Applied Geophysics*. 2015. Vol. 112. Pp. 129–135.
10. Kumar R., Choudhury D., Bhargava K. Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2016. Vol. 8. No 3. Pp. 341–349. DOI: 10.1016/j.jrmge.2015.10.009.
11. Gui Y.L., Zhao Z.Y., Jayasinghe L.B., Zhou H.Y., Goh A.T.C., Tao M. Blast wave induced spatial variation of ground vibration considering field geological conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 101. Pp. 63–68. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.11.016.
12. Li J.C., Li N.N., Chai S.B., Li H.B. Analytical study of ground motion caused by seismic wave propagation across faulted rock masses. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2017. Vol. 42. No 1. Pp. 95–109. DOI: 10.1002/nag.2716.
13. Bul'basheva I.A. *Upravlenie seismicheskimi vozdeystviyami vzryvov na opory LEP pri otkrytoy razrabotke mestorozhdeniy* [Management of the seismic effect of explosions on power transmission towers during open pit mining], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, SPbGU, 2019, 19 p.
14. Korshunov G.I., Bulbasheva I.A., Afanasyev P.I. Investigation of seismic effects on power lines during blasting. *Occupational Safety in Industry*. 2019, no 4, pp. 39–43. [In Russ].
15. Zykov V.S., Ivanov V.V., Sobolev V.V. Investigation of the influence of mass industrial explosions on the stability of underground mines during open-underground mining of coal deposits. *Occupational Safety in Industry*. 2018, no 11, pp. 19–23. [In Russ].
16. Ignatenko I.M., Yanitsky E.B., Dunaev V.A., Kabelko S.G. Fracturing of the rock mass in the quarry of the Zhelezny mine of Kovdorsky GOK JSC. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no 10, pp. 11–15. [In Russ].
17. Kutuzov B.N., Tyupin V.N. Determination of the sizes of the zones of deformation of a fractured mass by explosion of explosive charge. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 1983, no 4. C. 53–58. [In Russ].
18. Tyupin V.N. *Vzryvnye i geomekhanicheskie protsessy v treshchinovatykh napryazhennykh gornykh massivakh* [Explosive and geomechanical processes in fractured stressed mountain ranges], Belgorod, ID «Belgorod» NIU «BelGU», 2017, 192 p.

19. Tkachuk K. M., Tkachev S. I. Investigation of the action of a column charge explosion using high-speed filming. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 1966, no 4, pp. 73–76. [In Russ].

20. Tyupin V. N. Efficiency of crushing rocks by explosion during preliminary closure of macrocracks. *Gornyi Zhurnal*. 1978, no 9, pp. 41–44. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тюпин Владимир Николаевич¹ — д-р техн. наук, профессор, e-mail: tyupinvn@mail.ru,
Хаустов Владимир Васильевич¹ — д-р геол.-минерал. наук,

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет.

Для контактов: Тюпин В.Н., e-mail: tyupinvn@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.N. Tyupin¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: tyupinvn@mail.ru,

V.V. Khaustov¹, Dr. Sci. (Geol. Mineral.),

¹ Belgorod State National Research University, 308015, Belgorod, Russia.

Corresponding author: V.N. Tyupin, e-mail: tyupinvn@mail.ru.

Получена редакцией 07.05.2020; получена после рецензии 05.08.2020; принята к печати 10.01.2021.

Received by the editors 07.05.2020; received after the review 05.08.2020; accepted for printing 10.01.2021.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОРОД В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

(2020, № 11, СВ 37, 32 с.)

Джигрин А.В., Мельник В.В., Лупий М.Г., Бакин В.А.

Представлены результаты оптимизации параметров шахт со сложными условиями отработки угольных пластов, под которыми понимается совокупность горно-геологических факторов таких как наличие труднообрушающейся кровли, большой газоносности пласта и обводненности горного массива. Рассмотрены основные геологические факторы: петрографический состав пород; трещиноватость пород; глубина залегания; гидрогеологические условия, текстура и структура массива, влияющие на устойчивость горной выработки. Установлены коэффициенты влияния глубины разработки на устойчивость пород в горных выработках, позволяющие прогнозировать деформации будущих выработок и состояние горной крепи. Рассмотрены морфологические трещины всех трех видов: основные, торцовые, параллельные наслению. Установлено их влияние на структуру и текстуру массива. Определен коэффициент устойчивости пород в горных выработках. Устойчивость пород снижается прямо пропорционально плотности трещиноватости.

INVESTIGATION OF THE STABILITY OF ROCKS IN MINES COAL MINES

A.V. Dzhigrin, V.V. Melnik, M.G. Lupiy, V.A. Bakin

Presents results of optimization of parameters in mines with complex mining conditions of the coal seams, which are understood as a set of geological factors such as the presence of *trudnoporoshkuemey* roof, large gas content of the reservoir and the water content of the rocks. The main geological factors are considered: petrographic composition of rocks; fracturing of rocks; depth of occurrence; hydrogeological conditions, texture and structure of the massif that affect the stability of the mine workings. The coefficients of the influence of the depth of development on the stability of rocks in mine workings are established, which allow predicting the deformation of future workings and the state of the rock support. Morphological cracks of all three types are considered: main, end, parallel to the stratification. Their influence on the structure and texture of the array is established. The coefficient of rock stability in mine workings is determined. The stability of rocks decreases in direct proportion to the fracture density.