

DOI: 10.24000/0409-2961-2021-6-41-45

УДК 622.274.4

© В.Н. Тюпин, 2021



В.Н. Тюпин,
д-р техн. наук, проф.,
tyupinvn@mail.ru

ФГАОУ ВО «Белгородский
государственный национальный
исследовательский университет»,
Белгород, Россия

Прогнозирование скорости колебаний грунтов при массовых взрывах в подземных условиях

Рассмотрены вопросы прогнозирования скорости колебаний массива на земной поверхности при проведении подземных массовых взрывов в зависимости от их параметров, а также физико-технических свойств горных массивов в районах взрыва и охраняемого объекта. Приведены и обоснованы формулы расчета скорости колебаний массива на земной поверхности при проведении массовых взрывов в подземных условиях. По формулам рассчитаны скорости колебаний массива на земной поверхности в соответствии с параметрами буровзрывных работ при массовых взрывах в шахтах ГП «ВостГОК». Представленные исследования можно использовать для разработки правил проведения массовых взрывов при подземных горных работах.

Ключевые слова: массовые взрывы, подземные работы, прогнозирование, подземная геотехнология, камерная система разработки, скорость сейсмозрывных колебаний, охраняемый объект.

Для цитирования: Тюпин В.Н. Прогнозирование скорости колебаний грунтов при массовых взрывах в подземных условиях // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 6. — С. 41–45. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-6-41-45

Введение

Добыча полезных ископаемых с использованием подземной геотехнологии широко применяется в Российской Федерации и за рубежом [1–9]. Часто практикуют камерные системы разработки, где для отбойки руды используют массовые взрывы, что сопровождается формированием сейсмозрывных волн. Это приводит как к деформированию и разрушению открытых поверхностей подземных горных выработок, так и к нарушению целостности зданий и сооружений, находящихся на поверхности земли.

В настоящее время при массовых взрывах ученые в основном используют аналитическую зависимость, предложенную М.А. Садовским, где скорость колебаний массива определяется массой одновременно взрываемого заряда взрывчатого вещества (ВВ), расстоянием и коэффициентами, учитывающими число открытых поверхностей, расположение точки наблюдения относительно земной поверхности, а также горно-геологическое строение горного массива [10, 11]. Использование данной зависимости получило широкое распространение для разработки сейсмобезопасных технологий при открытой и подземной разработке месторождений полезных ископаемых. Такой подход эффективно применяется и в настоящее время. Однако научные исследования и производственный опыт показали, что скорость колебаний зависит от энергетических параметров ВВ, диаметра зарядов ВВ, числа одновременно взрываемых зарядов, числа ступеней замедления, длины зарядов ВВ, интервала замедления и т.д. [11–20].

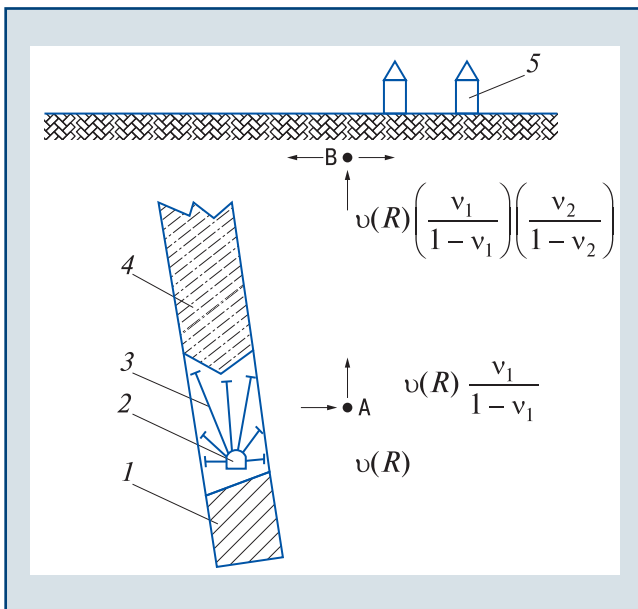
Цель статьи — прогнозирование скорости колебаний массива на земной поверхности при проведении подземных массовых взрывов в зависимости от их параметров, а также физико-технических свойств горных массивов в районах взрыва и охраняемого объекта.

Представлено обоснование формулы расчета скорости колебаний массива на поверхности земли при взрывной отбойке руды в камерах. Проведены численные расчеты по формуле, результаты сравнены с экспериментальными данными по скорости колебаний массива на поверхности с использованием параметров массовых взрывов и физико-технических свойств пород шахт ГП «ВостГОК» [17]. Получено доказательство правомерности формулы.

Обоснование формулы расчета скорости колебаний массива на поверхности земли

Формула расчета скорости колебаний массива при массовых взрывах на карьерах приведена в публикации [18], где доказана ее правомерность. Действие подземного массового взрыва на поверхностные здания и сооружения обладает некоторой спецификой (рис. 1, здесь 1 — рудное тело; 2 — подэтажный штрек; 3 — взрывные скважины; 4 — кладочный массив; 5 — охраняемые здания).

Известно, что сейсмозрывные волны распространяются с минимальными потерями в минимально нарушенных и наиболее напряженных участках массива, которые находятся на расстоянии, примерно равном ширине камеры. Можно предположить, что сейсмозрывная волна от короткозамедленного взрыва веером скважин преломляется в точке А



▲ Рис. 1. Схема для определения скорости колебаний поверхности земли при отбойке руды из подэтажных штреков

▲ Fig. 1. Scheme for determining the speed of vibrations of the earth surface when breaking ore from the sublevel drifts

(см. рис. 1), где ее значение уменьшается на величину $v_1(1 - v_1)^{-1}$, v_1 — коэффициент Пуассона горной породы в районе взрыва. В точке В (см. рис. 1) опять происходит преломление сейсмозврывной волны на величину $v_2(1 - v_2)^{-1}$, v_2 — коэффициент Пуассона горной породы в районе охраняемого объекта.

Скорость колебаний массива вблизи поверхности земли вычисляется по формуле:

$$v(R) = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \frac{D\rho_B d_3 c_1 v_1 v_2}{R\Phi_1 \rho_r c_r (1 - v_1)(1 - v_2)} \times \left(1 - \frac{\mu_1 v_1}{1 - v_1}\right) K_1 K_2 K_3 K_4, \quad (1)$$

где D — скорость детонации; ρ_B — плотность заряжения; d_3 — диаметр заряда ВВ; c_1 — скорость продольной волны в породе на участке между местом взрыва и охраняемым объектом; R — расстояние от крайних скважин блока; Φ_1 — средний показатель трещиноватости массива между местом взрыва и охраняемым объектом; ρ_r — плотность грунта в районе охраняемого объекта; c_r — скорость продольной волны в грунте в районе охраняемого объекта; μ_1 — коэффициент трения между отдельностями массива в районе взрыва; K_1 — показатель усиления действия взрыва параллельно одновременно взрываемой группе зарядов ВВ; K_2 — показатель усиления действия взрыва параллельно плоскостям вееро скважин за контуром отбойки при их короткозамедленном взрывании; K_3 — показатель усиления действия взрыва в зависимости от длины заряда ВВ; K_4 — коэффициент

отдачи, указывающий, какая часть энергии передается в окружающий место взрыва массив.

Показатели действия взрыва имеют вид [18]:

$$K_1 = \ln 2,7 [n - 2\mu_1 (n - 1)];$$

$$K_2 = \ln 2,7 [N - 2\mu_1 (N - 1)]; \quad (2)$$

$$K_3 = \ln 2,7 \left[\frac{l_3}{d_o} - 2\mu_1 \left(\frac{l_3}{d_o} - 1 \right) \right];$$

$$K_4 = \left(1 - \sum_{i=1}^z \frac{a_i (n_i^* - 1)}{2\pi W_i} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

где n — число зарядов ВВ в одновременно взрывающейся группе; N — число рядов скважин; l_3 — длина заряда ВВ в скважине; d_o — размер отдельности во взрывающемся массиве; z — число открытых поверхностей вблизи взрывающейся группы зарядов ВВ; a_i — расстояние между скважинами в ряду или (при веерной отбойке) половина расстояния между концами скважин; n_i^* — число скважин, взаимодействующих при их одновременном взрыве; W_i — линия наименьшего сопротивления.

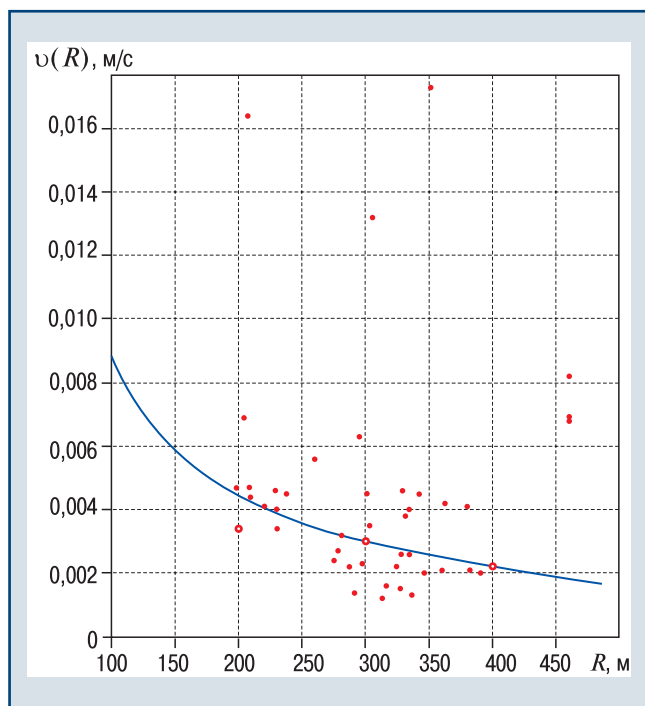
Расчеты скорости колебаний массива, обсуждение результатов

Для расчетов по формулам (1)–(3) проанализированы и использованы данные статьи [17]: ВВ — граммолит 79/21 с $D = 3,6 \cdot 10^3$ м/с; $\rho_B = 825$ кг/м³; $d_3 = 0,065$ м; $d_o = 0,7$ м; $n = 5-13$ (в среднем $n = 9$); $N = 2-5$ (в среднем $N = 3,5$); $l_3 = 3-12$ м (в среднем $l_3 = 7,5$ м); $R = 204-460$ м (в среднем $R = 292$ м, см. табл. 5 в [17]). На основании данных справочной литературы и публикаций [15, 16, 18] принимаем: $v_1 = v_2 = 0,25$; $\Phi_1 = 7$; $c_1 = 4 \cdot 10^3$ м/с; $\mu_1 = 0,45$; $\rho_r = 2 \cdot 10^3$ кг/м³; $c_r = 2 \cdot 10^3$ м/с. Расчеты по (2) и (3) дают: $K_1 = 1,58$; $K_2 = 1,22$; $K_3 = 1,67$; $K_4 = 0,5$.

Подставив численные значения в (1), получим $v(R) = 0,38 \cdot 10^{-2}$ м/с. Реальная скорость колебаний при подземных массовых взрывах, измеренная и приведенная в [17], составляет $(0,12 - 1,63) \cdot 10^{-2}$ м/с, средняя скорость смещения, определенная по табл. 5 в [17], равна $0,45 \cdot 10^{-2}$ м/с.

Скорости колебаний массива в зависимости от расстояния приведены на рис. 2: точки соответствуют фактическим значениям по [17], кривая отображает теоретические значения, полученные по формуле (1).

На рис. 2 виден разброс $v(R)$. Особенно выделяются шесть точек в верхней части графика. Можно предположить, что горный массив по линиям, соединяющим место взрыва и эти точки, имеет минимальную нарушенность (Φ_1 минимальна) и (или) находится в состоянии повышенной напряженности. Не исключено, что в точках наблюдения грунт имел малую акустическую жесткость ($\rho_r c_r$). Возможно, взрывали скважины большего диаметра. В целом теоретическая кривая $v(R)$ расположена симметрич-



▲ Рис. 2. Зависимость $v(R)$ от расстояния до массового взрыва R

▲ Fig. 2. Dependence of $v(R)$ on the distance to the mass explosion R

но относительно основных фактических значений скорости колебаний массива, что свидетельствует о правомерности зависимости (1).

Кроме того, справедливость формулы (1) обоснована математическим анализом влияния параметров массового взрыва, физико-технических свойств трещиноватого горного массива и грунтов на скорость колебаний, так как не противоречит исследованиям [10–20].

Использование формулы (1) в представленном виде выглядит сложным, ее можно упростить, введя постоянные и средние значения параметров:

$$\pi = 3,14; v_1 = v_2 = 0,25; \mu_1 = 0,45; \left(1 - \frac{\mu_1 v_1}{1 - v_1}\right) = 0,85;$$

$K_4 = 0,5$. Тогда (1) можно записать в виде:

$$v(R) = 10^{-2} \frac{D \rho_B d_3 c_1}{R \Phi_1 \rho_r c_r} K_1 K_2 K_3. \quad (4)$$

Формула (4) пригодна для предварительных расчетов скорости колебаний земной поверхности при известных параметрах подземного массового взрыва и его расположения, а также физико-технических свойствах массивов в районе взрыва и местоположении охраняемого объекта. Кроме того, изменяя регулируемые параметры (D , ρ_B , d_3 , K_1 , K_2 , K_3 , K_4) в формулах (1)–(4), можно количественно снижать интенсивность сейсмического воздействия взрыва на охраняемые подземные и поверхностные объекты.

Заключение

Обоснованы и приведены формулы расчета скорости колебаний массива на земной поверхности при проведении массовых взрывов в подземных условиях.

Рассчитаны скорости колебаний массива на земной поверхности по формулам в соответствии с параметрами буровзрывных работ при массовых взрывах в шахтах ГП «ВостГОК». Сравнение данных расчета и результатов фактических замеров свидетельствует об их сходимости. Упрощенную формулу можно применять для предварительных расчетов скорости колебаний массива на земной поверхности.

Перспективное направление дальнейших исследований — изучение влияния тектонических разломов, искусственных контурных щелей, закладочного массива или выработанного пространства на скорость сейсмозрывных колебаний при ведении взрывных работ в рудниках. Полученные результаты можно использовать для подготовки правил проведения массовых взрывов при подземных горных работах.

Список литературы

1. Крупномасштабное взрывное разрушение массивов горных пород: состояние и перспективы применения/ К.Н. Трубецкой, С.Д. Викторов, В.М. Закалинский, А.А. Осокин// Горный журнал. — 2016. — № 10. — С. 64–69. DOI: 10.17580/gzh.2016.10.13
2. Еременко А.А. Совершенствование технологии буровзрывных работ на железорудных месторождениях Западной Сибири. — Новосибирск: Наука, 2013. — 191 с.
3. Ломоносов Г.Г. Производственные процессы подземной разработки рудных месторождений. — М.: Горная книга, 2013. — 517 с.
4. Совершенствование скважинной отбойки/ А.В. Будько, В.М. Закалинский, С.К. Рубцов, А.А. Блинов. — М.: Недра, 1981. — 199 с.
5. Тюпин В.Н., Кубликов С.Н. Результаты дробления массивов железистых кварцитов при взрывании глубоких искривленных скважин на шахте им. Губкина АО «Комбината КМАруда»// Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 8. — С. 65–73. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-65-73
6. Lovitt M. Evolution of sublevel caving — safety improvement through technology. URL: https://www.researchgate.net/publication/302976369_Evolution_of_sublevel_caving_-_Safety_improvement_through_technology (дата обращения: 16.02.2021).
7. Lapčević V., Torbica S. Numerical Investigation of Caved Rock Mass Friction and Fragmentation Change Influence on Gravity Flow Formation in Sublevel Caving// Minerals. — 2017. — Vol. 7. — Iss. 4. — P. 56. DOI: 10.3390/min7040056
8. Draw control strategies in sublevel caving mines — A baseline mapping of LKAB's Malmberget and Kiirunavaara mines/ G. Shekhar, A. Gustafson, P. Boeg-Jensen et al.// Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. — 2018. — Vol. 118. — Iss. 7. — P. 723–733. DOI: 10.17159/2411-9717/2018/v118n7a6

9. Nordqvist A., Wimmer M. Holistic Approach to Study Gravity Flow at the Kiruna Sublevel Caving Mine// Proceedings of the 7th International Conference and Exhibition on Mass Mining. — Sydney, 2016. — P. 401–414.

10. Садовский М.А. Сейсмика взрывов и сейсмология// Известия АН СССР. Физика Земли. — 1987. — № 11. — С. 34–42.

11. Кутузов Б.Н. Безопасность взрывных работ в горном деле и промышленности. — М.: Горная книга, 2009. — 670 с.

12. Адушкин В.В., Спивак А.А. Подземные взрывы. — М.: Наука, 2007. — 578 с.

13. Мосинец В.Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. — М.: Недра, 1976. — 271 с.

14. Сейсмическая безопасность при взрывных работах/ В.К. Совмен, Б.Н. Кутузов, А.Л. Марьясов и др. — М.: Горная книга, 2002. — 228 с.

15. Тюпин В.Н., Анисимов В.Н. Разработка методов сохранения устойчивости открытых поверхностей трещиноватых горных массивов при проведении массовых взрывов// Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 4. — С. 53–62. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-53-62

16. 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

17. Ляшенко В.И., Дудченко А.Х. Сейсмотехнология подземной разработки урановых месторождений// Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 5. — С. 34–40.

18. Tyupin V.N. Geomechanical behavior of jointed rock mass in the large-scale blast impact zone// Eurasian Mining. — 2020. — № 2. — P. 11–14. DOI: 10.17580/em.2020.02.03

19. Коршунов Г.И., Бульбашева И.А., Афанасьев П.И. Исследование сейсмического воздействия на линии электропередачи при ведении взрывных работ// Безопасность труда в промышленности. — 2016. — № 4. — С. 39–43.

20. 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. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-11-19-23

tyupinvn@mail.ru

Материал поступил в редакцию 20 февраля 2021 г.

«Bezопасnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2021, № 6, pp. 41–45.
DOI: 10.24000/0409-2961-2021-6-41-45

Prediction of the Ground Vibration Rate during Large-scale Explosions in the Underground Conditions

V.N. Tyupin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., tyupinvn@mail.ru

Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

Abstract

At present, to ensure seismic safety in massive explosions, the analytical dependence of the determination of the vibration velocity of M.A. Sadovsky rock mass is mainly used. This dependence is widely used in the creation of seismic-safe technologies for mineral deposits open-pit and underground mining. However, scientific research and production experience showed that the rate of oscillation depends on the energy parameters of the explosive, the diameter and length of its charges, the number of simultaneously exploded charges, the number of deceleration stages, the deceleration interval, etc. The purpose of this article is to predict the speed fluctuations of the massif on the earth surface when conducting the underground explosions depending on the parameters of large-scale explosions and physical-technical properties of the rock masses in the areas of explosion of the protected object. The formulas for calculating the velocity of rock mass on the earth surface during large-scale explosions in the underground conditions are substantiated and presented. The formulas were used for calculating the vibration velocities of the rock mass on the earth surface in accordance with the parameters of drilling and blasting operations during large-scale explosions in the mines of GK VostGOK. Comparison of theoretical (calculated) data and the results of actual measurements indicates their convergence. By changing the controlled parameters in the calculation formulas, it is possible to quantitatively reduce the seismic effect of a large-scale explosions on the protected objects. Further research will be aimed at studying the influence of tectonic faults, artificial contour crevices, filling massif or mined-out space on the rate of seismic-explosive vibrations during blasting operations in the mines. The research results can be used in the preparation of rules for conducting large-scale explosions at the underground mining.

Key words: large-scale explosions, underground works, prediction, underground geotechnology, chamber development system, speed of seismic and explosive vibrations, protected object.

References

1. Trubetskoy K.N., Victorov S.D., Zakalinsky V.M., Osokin A.A. Large-scale explosive destruction of rock masses: Current state and potential applications. *Gornyy zhurnal = Mining journal*. 2016. № 10. pp. 64–69. (In Russ.). DOI: 10.17580/gzh.2016.10.13
2. Eremenko A.A. Improvement of drilling and blasting operations technology at the iron-ore deposits of the Western Siberia. Novosibirsk: Nauka, 2013. 191 p. (In Russ.).
3. Lomonosov G.G. Production processes of ore deposits underground mining. Moscow: Gornaya kniga, 2013. 517 p. (In Russ.).
4. Budko A.V., Zakalinskiy V.M., Rubtsov C.K., Blinov A.A. Longhole stoping improvement. Moscow: Nedra, 1981. 199 p. (In Russ.).
5. Tyupin V.N., Kublikov S.N. Blasting Fragmentation of Ferruginous Quartzites in Long Deflected Holes in the Gubkin Mine, KMAruda. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019. № 8. pp. 65–73. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-65-73
6. Lovitt M. Evolution of sublevel caving — safety improvement through technology. Available at: <https://www.researchgate.net>

net/publication/302976369_Evolution_of_sublevel_caving_-_Safety_improvement_through_technology (accessed: February 16, 2021).

7. Lapčević V., Torbica S. Numerical Investigation of Caved Rock Mass Friction and Fragmentation Change Influence on Gravity Flow Formation in Sublevel Caving. *Minerals*. 2017. Vol. 7. Iss. 4. P. 56. DOI:10.3390/min7040056

8. Shekhar G., Gustafson A., Boeg-Jensen P., Malmgren L., Schunnesson H. Draw control strategies in sublevel caving mines — A baseline mapping of LKAB's Malmberget and Kiirunavaara mines. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018. Vol. 118. Iss. 7. pp. 723–733. DOI:10.17159/2411-9717/2018/v118n7a6

9. Nordqvist A., Wimmer M. Holistic Approach to Study Gravity Flow at the Kiruna Sublevel Caving Mine. *Proceedings of the 7th International Conference and Exhibition on Mass Mining*. Sydney, 2016. pp. 401–414.

10. Sadovskiy M.A. Explosion seismic and seismology. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli = News of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth*. 1987. № 11. pp. 34–42. (In Russ.).

11. Kutuzov B.N. *Blasting operations safety in mining and industry*. Moscow: Gornaya kniga, 2009. 670 p. (In Russ.).

12. Adushkin V.V., Spivak A.A. *Underground explosions*. Moscow: Nauka, 2007. 578 p. (In Russ.).

13. Mosinets V.N. *Crushing and seismic effects of an explosion in the rocks*. Moscow: Nedra, 1976. 271 p. (In Russ.).

14. Sovmen V.K., Kutuzov B.N., Maryasov A.L., Ekvist B.V., Tokarenko A.V. *Seismic safety during blasting operations*. Moscow: Gornaya kniga, 2002. 228 p. (In Russ.).

15. Tyupin V.N., Anisimov V.N. Methods of stability retention of exposed rock surfaces in fractured rock mass under large-scale blasting. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019. № 4. pp. 53–62. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-53-62

16. Tyupin V.N., Khaustov V.V. Geomechanical behavior of jointed rock mass versus delay interval in seismic load zone of large-scale blasts. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021. № 2. pp. 45–54. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-45-54

17. Lyashenko V.I., Dudchenko A.Kh. Seismic Safe Technology of the Uranium Deposit Underground Development. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2012. № 5. pp. 34–40. (In Russ.).

18. Tyupin V.N. Geomechanical behavior of jointed rock mass in the large-scale blast impact zone. *Eurasian Mining*. 2020. № 2. pp. 11–14. DOI: 10.17580/em.2020.02.03

19. Korshunov G.I., Bulbasheva I.A., Afanasev P.I. Study of Seismic Effect on the Line of Power Supply at Conducting Blast Operations. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2016. № 4. pp. 39–43. (In Russ.).

20. Zykov V.S., Ivanov V.V., Sobolev V.V. Studies of the Effect of Massive Industrial Explosions on the Stability of the Underground Mining Workings at the Open-pit and Underground Mining of Coal Deposits. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2018. № 11. pp. 19–23. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2018-11-19-23

Received February 20, 2021