

УДК 550.34.052:622.271.3

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЙСМОБЕЗОПАСНЫХ РАССТОЯНИЙ
ПРИ МАССОВЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВАХ
С УЧЕТОМ ПРЕОБЛАДАЮЩЕЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ**

**DETERMINATION OF SEISMIC SAFE DISTANCES DURING MINING BLASTS
WITH CONSIDERATION OF A DOMINANT VIBRATION FREQUENCY**

Новиньков Алексей Геннадьевич¹

кандидат техн. наук, доцент, e-mail: novinkova@mail.ru

Novinkov Aleksey G.¹, Ph. D., Associate Professor

Протасов Сергей Иванович¹

доктор техн. наук, профессор, e-mail: psi_rmpio@kuzstu.ru

Protasov Sergey I.¹, Dr. Sc., Professor

Самусев Павел Александрович²

кандидат техн. наук, доцент, e-mail: spa.rmpio@kuzstu.ru

Samusev Pavel A.², Ph. D., Associate Professor

Ташкинов Александр Сергеевич² firma@kuzbass-niiogr.ru

Tashkinov Aleksandr S.²

¹Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 650000, ул. Весенняя, 28, г. Кемерово, Российская Федерация

¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University Kemerovo, Russian Federation

²Новационная фирма «КУЗБАСС-НИИОГР», 650054, Пионерский бульвар, 4А, г. Кемерово, Российская Федерация

²Novation company KUZBASS-NIIOGR Kemerovo, Russian Federation

Аннотация. Предлагается метод определения сейсмобезопасных расстояний при ведении взрывных работ на горных предприятиях, учитывающий величину преобладающих частот колебаний земной поверхности. Метод основан на регрессионном анализе экспериментальных данных, характеризуется привычной структурой и простотой. В качестве критерия сейсмической опасности используется коэффициент безопасности, представляющий собой отношение пиковой скорости колебаний к ее предельно допустимой величине, принятой по нормативным документам, с учетом доминирующей частоты колебаний. Вместо пиковой скорости колебаний могут использовать и другие параметры колебаний, например, максимальные смещения земной поверхности. Также допускается использование смешанных критериев сейсмической опасности. Качество регрессии оценивается с помощью статистического анализа остатков.

Метод основан на анализе экспериментальных данных и по этой причине полностью учитывает как особенности ведения взрывных работ на конкретном горном предприятии, так и геологические и гидрологические условия на пути распространения сейсмических волн.

Приведен пример использования предлагаемого метода на одном из угольных карьеров Кузбасса.

Abstract. A method for determining the seismic safety distances for blasts in open-pit mines, taking into account the dominant frequency of the vibrations is discussed. The method is based on a regression analysis of the experimental data; the structure of method is characterized by a familiarity and easiness. The safety factor is used as the seismic hazard criteria. This factor is the ratio of peak particle velocity to its maximum allowed value adopted by the Regulations. Instead of peak particle velocity may be used other parameters of vibrations, such as the maximum displacement. It is also allowed the use of the mixed criteria of seismic hazard. The quality of regression is evaluated using the statistical analysis of residues. The proposed method is exemplified in seismic hazard analysis on one of the Kuzbass coal pit mines.

Ключевые слова. Взрывные работы; сейсмическая безопасность; регрессионный анализ; преобладающие частоты колебаний; открытые горные работы; разрезы и карьеры.

Keywords. Blasting operations; seismic safety; regression analysis; the dominant frequency of the vibrations; open pit mining; mines and quarries.

Введение.

Проблема сейсмической безопасности зданий и сооружений при ведении взрывных работ на

горных предприятиях, не смотря на достаточно большое количество исследований в этой области (например, [1-5]), все еще остается актуальной.

Федеральные нормы и правила [6], недавно вступившие в силу, сохранили достаточно серьезные ограничения в области их применения, присущие прежним редакциям нормативных документов, действующих на территории Российской Федерации. Так, например, приводятся указания по определению сейсмобезопасных расстояний при неодновременном взрывании N зарядов общей массой Q , при этом замедления между взрывами каждого заряда должно быть не менее 20 мс. Если время замедления между взрывами отдельных зарядов составляет менее 20 мс, то группа из таких зарядов должна рассматриваться, как отдельный заряд с общей массой для всей группы. Такой подход применялся при порядном взрывании с использованием детонирующего шнура и замедлениями между отдельными рядами зарядов и был вполне адекватен применявшимся тогда технологиям взрывных работ. Однако, массовый переход на неэлектрические системы инициирования с межскважинными замедлениями, сделал использование указаний [6] невозможным. В этих случаях временной интервал между взрывами каждого скважинного заряда может быть существенно меньше 20 мс. В таких случаях разработчики норм рекомендуют обращаться в специализированные организации. При этом специализированные организации, как правило, разрабатывают свои заключения, основываясь преимущественно на результатах экспериментальных исследований в условиях конкретных горных предприятий. В качестве критерия сейсмической безопасности обычно используется неравенство $v \leq v_{lim}$, где v – прогнозируемая пиковая скорость колебаний в основании защищаемого объекта, а v_{lim} – предельно допустимая скорость колебаний для зданий или сооружений. Затем используются известные зависимости между пиковой скоростью колебаний v , расстоянием от взываемого блока до защищаемого объекта R , а также массой взрывчатого вещества в условной группе зарядов Q :

$$v = a \cdot \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}}\right)^b \quad (1)$$

При этом a и b – представляют собой оценки параметров регрессии, полученные, как правило, методом наименьших квадратов по результатам экспериментальных исследований. За Q в практике ведения взрывных работ принимается наибольшая масса взрывчатого вещества в пределах скользящего 20-мс окна.

Следует отметить, что в разных странах используются несколько отличающиеся от (1) типы зависимостей. Так, например, в США, Великобритании и ряде других стран [7–9] в знаменателе вместо кубического корня используется квадратный корень, а Q определяется не по 20-мс, а по 8-мс скользящему окну. Как было показано в [10] принципиальная разница между видом регрессии

онной зависимости, связывающей скорость колебаний с параметрами взрыва и расстоянием до защищаемого объекта, отсутствует. Отличия в способе представления вида регрессии сказывается только на самих величинах a и b , не оказывая влияния на надежность прогноза скорости колебаний. Величины предельно допустимых скоростей колебаний v_{lim} российские нормативные документы [6] рекомендуют принимать с учетом нормативных документов других стран [8,9,12].

Изложенный подход, в сочетании с рядом статистических оценок достоверности прогноза, позволяет прогнозировать пиковую скорость колебаний с заданным уровнем надежности [13]. Однако такой подход, не учитывает важное обстоятельство: величина предельно допустимой скорости колебаний v_{lim} зависит от преобладающей частоты колебаний. В [14] на примере нескольких горных предприятий, использующих различные технологии взрывания, была показана в некоторых случаях необходимость учета этого обстоятельства. В связи со всем выше изложенным, была поставлена задача: разработать методику определения сейсмобезопасных расстояний, имеющую привычную структуру, но, в то же время, учитывающую преобладающие частоты колебаний.

Материалы и методы

Регистрация сейсмических колебаний от горных взрывов производилась геофонами Instantel Minimate Plus, Instantel Micromate, а также автономными комплексами, состоящими из трехканальных 24-разрядных сейсмических регистраторов «Байкал АС» с частотой дискретизации до 600 Гц, сеймостанции «Ангара» и сейсмоприемников А1632 и А1638 с рабочим диапазоном частот 0.1–200 Гц и 0.1–400 Гц соответственно.

Обработка сейсмических сигналов, полученных на геофонах, производилась с использованием программного обеспечения Blastware 10.74 (Instantel). Обработка включала в себя анализ исходных сейсмических сигналов, получение спектра частот колебаний методом быстрого преобразования Фурье (БПФ). В некоторых случаях также проводилась первичная обработка сигналов для удаления низкочастотных составляющих, связанных с искажениями сигнала в трактах аппаратуры.

Обработка сейсмических сигналов, полученных с помощью комплексов «Байкал-Ангара», производилась схожим образом в среде Mathcad. Первичные акселерограммы интегрировались и из них удалялись низкочастотные составляющие по методике [15]. Получение спектра частот производилось также с помощью БПФ.

Для построения регрессии использовался метод наименьших квадратов (МНК). Количество экспериментальных точек соответствовало возможности построения доверительных интервалов для линии регрессии с обеспеченностью 0.95.

Таблица. Характеристики взрывов

Способ взрывания, замедления между скважинами	Тип вмещающих пород	Диапазон общих масс ВВ на блоке в тротиловом эквиваленте, кг	Масса ВВ и количество скважин в пределах скользящего 20-мс окна, кг	Количество условных групп зарядов
СИНВ «Искра», межскважинные замедления 25 и 67 мс	Алевролиты крепостью 5-6, песчаники крепостью 7	20443-145491	425,5-8220,8	4-123

Результаты и обсуждение.

Для учета преобладающих частот вводился коэффициент безопасности для i -ой точки наблюдений KS_i :

$$KS_i = \frac{v_i}{v_{lim,i}(f_d)} \quad (2)$$

Здесь v_i – пиковая скорость колебаний, зарегистрированная в i -ой точке наблюдений; $v_{lim,i}(f_d)$ – предельно допустимая скорость колебаний с учетом доминирующей частоты колебаний f_d , полученная для i -ой точки наблюдений. Значение коэффициента безопасности KS_i принималось равной наибольшей величине, полученной для каждой из компонент x, y, z :

$$KS_i = \max \left(\frac{v_{x,i}}{v_{lim,i}(f_{x,d})}; \frac{v_{y,i}}{v_{lim,i}(f_{y,d})}; \frac{v_{z,i}}{v_{lim,i}(f_{z,d})} \right) \quad (3)$$

При таком подходе значения $KS_i \leq 1.0$ соответствуют безопасным уровням колебаний в i -ой точке, а значения $KS_i > 1.0$ сигнализируют о превышении допустимого уровня колебаний. Дополнительным преимуществом такого подхода является то, что он позволяет использовать в од-

ной регрессии смешанные критерии. Например, в [9] пиковая скорость колебаний используется в качестве критерия сейсмической опасности только при доминирующих частотах колебаний выше 4 Гц. При преобладающих частотах ниже 4 Гц, в качестве критерия сейсмической опасности используется смещение земной поверхности, которое не должно превышать 0.6 мм. Наличие смешанных критериев не позволяет использовать единую регрессию для прогнозирования сейсмической опасности.

На следующем этапе выполняется регрессионный анализ и вычисляется верхняя граница доверительного интервала для линии регрессии, позволяющие связать значения коэффициентов безопасности с расстоянием до защищаемого объекта и массой взрывчатого вещества в скользящем 20-мс окне. Ограничивающая значение коэффициента безопасности величиной $KS = 1.0$ и, зная, расстояние от границы взываемого блока до защищаемого объекта, можно установить предельно допустимое значение массы взрывчатого вещества в группе скважин, попадающих в 20-мс окно.

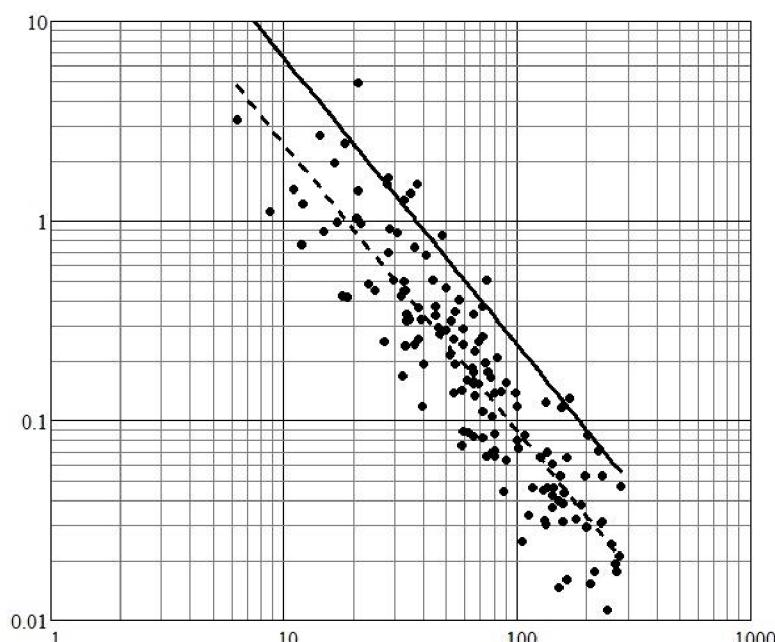


Рис. 1. Линия регрессии (---) и верхняя граница доверительного интервала (—) с обеспеченностью 0.95. По оси абсцисс отложены значения $\frac{R}{\sqrt{Q}}$, по оси ординат отложены значения KS

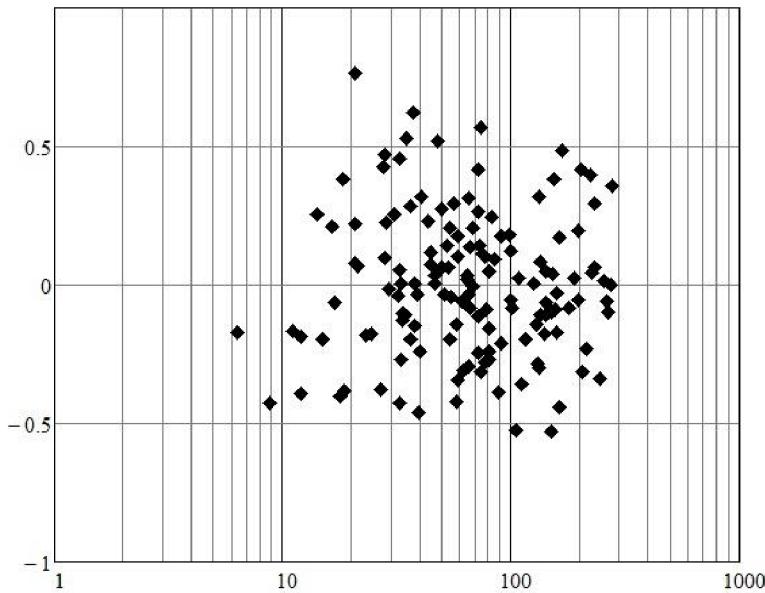


Рис. 2. Проверка независимости остатков от приведенного расстояния $\frac{R}{\sqrt[3]{Q}}$. По оси абсцисс отложены приведенные расстояния $\frac{R}{\sqrt[3]{Q}}$. По оси ординат отложены остатки

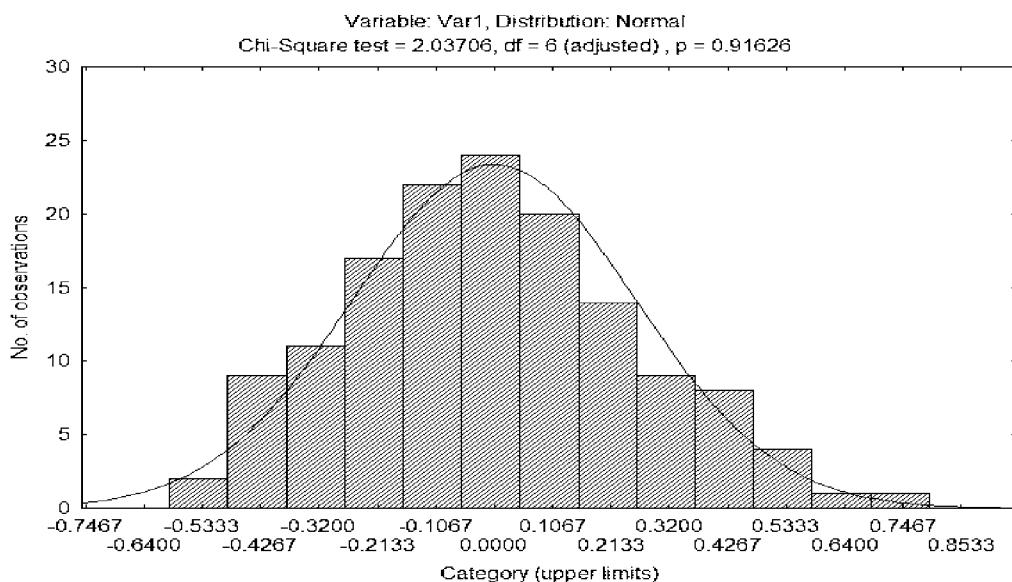


Рис. 3. Результаты проверки соответствия фактического распределения остатков нормальному закону

Приведем пример использования предлагаемого подхода для анализа сейсмической безопасности на Ерунковском поле разреза «Талдинский» (ОАО «УК «Кузбассразрезуголь»). Все проанализированные взрывы выполнялись с использованием неэлектрической системы инициирования «Искра». Параметры взрывных работ для зарегистрированных взрывов на этом угольном карьере, приведены в таблице.

Всего были проанализированы 10 взрывов (144 трехкомпонентных сейсмограммы). Предельно допустимые скорости колебаний в зависимости от преобладающей частоты колебаний v_{lim} принимались по [8]. Была построена регрессии и

верхняя граница доверительных интервалов с обеспеченностью 0.95. Параметры регрессии оценивались с помощью метода наименьших квадратов. Расчетные уравнения регрессии с учетом ширины доверительного интервала имели вид:

$$KS = 178.23 \cdot \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}}\right)^{-1.436} \quad (4a)$$

или

$$\log_{10}(KS) = 2.251 - 1.436 \log_{10}\left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}}\right) \quad (4b).$$

Коэффициент детерминации для регрессионной модели составил 0.8.

Регрессия и расчетная граница верхнего доверительного интервала регрессии приведена на рис.

1.

Качество регрессии, полученной с использованием МНК, дополнительно оценивалось с применением статистического анализа остатков [10,13]. Под остатками здесь подразумевается случайные отклонения логарифмов наблюденных значений $K\sigma_i$ от логарифмов значений регрессии в этих же точках. Тест Дарбина-Уотсона показал, что в модели присутствует определенная автокорреляция остатков (значение статистики Дарбина-Уотсона оказалось равным 1.14 при нижнем и верхнем критических значениях равных 1.61 и 1.65 соответственно). Практика анализа сейсмической безопасности на большом числе горных предприятий показывает, что избежать автокорреляции остатков регрессии обычно не удается, т.к. в большинстве случаев в условиях действующего горного предприятия исследователи ограничены как в параметрах взрывов, так и в выборе мест для установки сейсморегистраторов. При наличии автокорреляции линейная регрессионная модель, оставаясь несмещенной и состоятельной, перестает быть эффективной, т.е. дисперсия в этом случае не является наименьшей.

Проверка остатков на гомоскедастичность (постоянство дисперсии остатков) на всем интервале объясняющей переменной осуществлялась с помощью критерия ранговой корреляции Спирмена, значение статистики для которого составило 0.24. Критическое значение статистики на уровне значимости 0.05 было равным 1.656. Таким образом, можно считать, что дисперсия постоянна на всем интервале $\frac{R}{\sqrt{Q}}$.

Также, в соответствии с условиями Гаусса–Маркова, регрессионная модель проверялась на

независимость остатков от объясняющей переменной. Тестирование показало отсутствие такой корреляции, см. рис. 2.

Также было проверено соответствие фактического распределения остатков нормальному закону. Результаты проверки представлены на рис. 3.

С учетом всего сказанного выше можно считать, что регрессионная модель коэффициента безопасности является вполне соответствующей практическим целям прогноза сейсмической безопасности.

Заключение.

1. Предложенный подход с использованием коэффициентов безопасности позволяет вполне адекватно учесть величину доминирующей частоты колебаний. Метод прост и имеет прозрачную и привычную внутреннюю структуру.

2. Рассмотренный метод позволяет использовать смешанные критерии сейсмической опасности, при которых в одном диапазоне преобладающих частот в качестве параметра, характеризующего опасность колебаний, используются скорости колебаний, а в другом диапазоне частот контролируются смещения земной поверхности.

3. Метод основан на экспериментальных данных и по этой причине полностью учитывает особенности ведения взрывных работ на конкретном горном предприятии, а также геологические и гидрологические условия на пути распространения сейсмических волн.

4. Учет преобладающих частот позволяет отказаться от оценки сейсмической опасности по одной, самой неблагоприятной, доминирующей частоте колебаний. Это позволяет расширить рабочий диапазон параметров взрывных работ без снижения уровня сейсмической безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Е.Н. Шер. Сейсмические колебания при массовых взрывах на карьерах с использованием высокочастотной электронной и неэлектрической систем взрывания // Е.Н. Шер, А.Г. Черников // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых (Journal of mining science), 2009, № 6, с. 54-60.
2. Пазынич А. Ю. Сейсмическое воздействие массовых взрывов на наземные сооружения (на примере разреза “Нерюнгринский”): автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Нерюнгри: Технический институт (филиал) ГОУ ВПО ЯГУ, 2009
3. Мучник С. В. О снижении сейсмического эффекта при массовых взрывах на карьерах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых (Journal of mining science), 2011. № 4. – с. 68-77
4. Ляшенко В.И. Создание и внедрение сейсмобезопасной технологии подземной разработки урановых месторождений / В.И. Ляшенко, А.Х. Дудченко // Научный вестник национального горного университета, 2012, №3. 54-62.
5. Reza Nateghi. Evaluation of blast induced ground vibration for minimizing negative effects on surrounding structures. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, No. 43, pp. 133-138.
6. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Правила безопасности при взрывных работах. Сборник документов. Серия 13. Выпуск 14. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. – 332 с.
7. Duvall, W. I. Vibrations from instantaneous and millisecond-delayed quarry blasts. / W. I. Duvall, Ch. F. Johnson A. V. C. Meyer, J. F. Devin. Report of investigations, RI 6151. US Dept. of Interior. Bureau of Mines. Washington, 1963. – 34 p.
8. OSM Blasting Performance Standards. 30 Code of Federal Regulations. Sec. 816.67. Use of Explosives: Control of adverse effects.

9. BS 7385-2:1993. British Standard. Evaluation and measurement for vibration in buildings. Part 2: Guide to damage levels from groundborne vibration. BSI, 1993. – 15 p.
10. Новиньков А.Г. Оценка сейсмобезопасности промышленных взрывов / А.Г. Новиньков, С.И. Протасов, А.С. Гукин // Безопасность труда в промышленности №6, 2013. – с. 40-46.
11. ГОСТ Р 52892-2007. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию. М.: Стандартинформ, 2008. - 52 с.
12. DIN 4150-3:1999. Structural Vibration. Part 3: Effects of vibration on structures. 1999. – 11 p.
13. Новиньков А.Г. Статистическая надежность прогнозирования пиковой скорости колебаний при массовых промышленных взрывах / А.Г. Новиньков, С.И. Протасов, П.А. Самусев, А.С. Гукин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2015, №5. – с.50-58.
14. Новиньков А.Г. Анализ преобладающих частот колебаний при массовых взрывах на горных предприятиях / А.Г. Новиньков, С.И. Протасов // Взрывное дело, 2015, №114/71. – с.295-308.
15. D. M. Boore. Using Pad-Stripped Filtered Strong-Motion Data / D. M. Boore, A. A. Sisi, S. Akkar // Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 102, No2, pp. 751-760, April 2012.

REFERENCES

1. E.N. Sher. Seismic vibrations in open surface mining blasts using high-precision electronic and nonelectric blasting systems // E.N. Sher, A.G. Chernikov // Physical and technical issues of mineral resources development (Journal of mining science), 2009, No. 6, pp. 54-60.
2. A.Yu. Pazynych. A seismic impact of mining blasts on surface structures (as in the case of Neryungrinsky open-pit mine): Author's abstract of PhD Thesis. ... PhD. — Neryungry: Technical Institute (Branch) GOU VPO YaSU, 2009.
3. S.V. Muchnik. On reduction of seismic effect in open surface mining blasts // Physical and technical issues of mineral resources development (Journal of mining science), 2011. No. 4. – pp. 68-77.
4. V.I. Lyashenko. Creation and implementation of seismic safe underground mining of uranium deposits / V.I. Lyashenko, A.H. Dudchenko // Scientific Bulletin of the National Mining University, 2012, No.3. pp. 54-62.
5. Reza Nateghi. Evaluation of blast induced ground vibration for minimizing negative effects on surrounding structures. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, No. 43, pp. 133-138.
6. Federal industrial safety rules and regulations. Safety regulations for blasting operations. Collection of documents. Series 13. Issue 14. – M.: ZAO Scientific and technical centre of industrial safety problems investigation, 2014. – p. 332.
7. Duvall, W. I. Vibrations from instantaneous and millisecond-delayed quarry blasts. / W. I. Duvall, Ch. F. Johnson A. V. C. Meyer, J. F. Devin. Report of investigations, RI 6151. US Dept. of Interior. Bureau of Mines. Washington, 1963. – 34 p.
8. OSM Blasting Performance Standards. 30 Code of Federal Regulations. Sec. 816.67. Use of Explosives: Control of adverse effects.
9. BS 7385-2:1993. British Standard. Evaluation and measurement for vibration in buildings. Part 2: Guide to damage levels from ground-borne vibration. BSI, 1993. – 15 p.
10. A.G. Novinkov. An assessment of seismic safety of large-scale mining blasts / A.G. Novinkov, S.I. Protasov, A.S. Gukin // Bezopastnost' truda v promyshlennosti (Safety in industry) No.6, 2013. – pp. 40-46.
11. GOST R 52892-2007. Vibration and impact. Vibration of buildings. Measuring vibration and assessment of its impact on a structure. M.: Standartinform, 2008. – p. 52.
12. DIN 4150-3:1999. Structural Vibration. Part 3: Effects of vibration on structures. 1999. – 11 p.
13. A.G. Novinkov, S.I. Protasov, P.A. Samusev, A.S. Gukin. Statistic reliability of peak particle velocity prediction in mining blasts. *Physical and technical issues of mineral resources development*. 2015. No.5. pp.50-58.
14. A.G. Novinkov. Analysis of dominant vibration frequencies in large-scale mining blasts / A.G. Novinkov, S.I. Protasov // Vzryvnoe delo (Explosion technology), 2015, No.114/71. – pp. 295-308.
15. D. M. Boore, A. A. Sisi, S. Akkar Using Pad-Stripped Filtered Strong-Motion Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*. vol. 102. No 2. pp. 751-760, April 2012