

**А.Н. Холодилов, А.П. Господариков**  
**МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ**  
**СЕЙСМИЧЕСКОЙ**  
**БЕЗОПАСНОСТИ МАССОВЫХ**  
**ВЗРЫВОВ, ПРОИЗВОДИМЫХ**  
**НА ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКАХ,**  
**ВБЛИЗИ НАДШАХТНЫХ**  
**СООРУЖЕНИЙ**

Рассмотрены вопросы обеспечения сейсмической безопасности надшахтных сооружений при ведении взрывных работ на подземных рудниках на ранних этапах разработки месторождения полезных ископаемых. Проанализировано влияние поверхностных сейсмических волн, распространяющихся по горным выработкам, на сейсмическое действие взрыва. Обсуждены возможные причины катастрофических последствий в результате слабых сейсмических воздействий. Предложен новый критерий оценки сейсмической безопасности охраняемых объектов, основанный на сопоставлении отклика системы грунт – наземные сооружения на сейсмическое воздействие взрывных работ с уровнем такого воздействия. Ключевые слова: сейсмическая безопасность, надшахтное сооружение, сейсмические волны, скорость смещения грунта, сейсмозрывные колебания, приведенное расстояние, взрывные работы.

**Н**а начальных этапах развития подземных рудников ведение взрывных работ, как правило, происходит вблизи земной поверхности и наземных зданий и сооружений, что служит предпосылкой создания угроз по сейсмическому фактору.

Существующие методики прогноза сейсмического воздействия взрыва базируются на формуле М.А. Садовского, связывающей модуль вектора скорости смещения грунта с приведенным расстоянием. В этой формуле параметры связи (коэффициент сейсмичности и показатель затухания) определяются статистическими методами на основе большого набора данных инструментальных измерений.

Справедливость такого подхода учитывает геометрическую однородность горного массива. В действительности, разрабатываемый массив характеризуется наличием внутренней нарушен-

ности (трещины, тектонические разломы) и постоянно меняющимся выработанным пространством, влияющим на механизм распространения сейсмических волн в нем. В одном случае это может приводить к сильному затуханию сейсмической волны, в другом – к облегчению условий ее распространения, например, когда горная выработка служит в качестве волновода. Численные результаты измерений, относящиеся к указанным условиям, ложатся либо выше линии регрессии, либо ниже ее. В случае неудовлетворения статистическим критериям эти значения вообще могут выбрасываться из рассмотрения как промахи. В результате возникает опасность недостоверного прогноза сейсмического воздействия взрыва на охраняемые сооружения, в частности, занижение уровня такого воздействия.

Настоящая статья является дальнейшим развитием методологии выбора критерия сейсмической безопасности надшахтных сооружений подземных рудников, изложенной в работе [1] на примере Новоширокинского рудника. Предметом обсуждения стал факт обрушения кирпичной кладки здания, в который выходит клетевой ствол шахты, по истечении небольшого промежутка времени после производства массового взрыва. В статье так же обосновывается выбор предельно допустимой скорости грунта в основании охраняемого объекта согласно рекомендациям, приведенным в нормативном документе [4]. Недостаток такого подхода выражается в том, что велика роль субъективного фактора, когда экспертная оценка состояния охраняемого объекта может приводить либо к резкому ужесточению требований промышленной безопасности по сейсмическому фактору при ведении взрывных работ, либо, наоборот, к недооценке сейсмической опасности. В первом случае резко ограничивается производительность горного предприятия, во втором случае возможны повреждения зданий и сооружений, находящихся в зоне влияния взрывных работ.

Если каким-либо образом обосновано предельное значение модуля скорости смещения грунта в основании охраняемого объекта согласно упомянутому выше нормативному документу или, например, по методу ранжирования объектов с учетом состояния и типа их несущих конструкций, материала стен, важности объектов [3], то возникает задача прогноза значения модуля скорости смещения с целью определения сейсмобезопасных параметров взрывных работ. Традиционно последняя задача решается путем установления функциональной зависимости для прогнозного значения скорости смещения:

$$v_{np} = K \cdot (\bar{R})^{-n}, \quad (1)$$

где  $\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}}$  – приведенное расстояние ( $R$  – расстояние по сейс-

мическому лучу от взрываемого заряда до точки наблюдения, м;  $Q$  – масса единовременно взрываемого заряда, кг);  $K$  – коэффициент сейсмичности;  $n$  – показатель затухания сейсмических волн. Величины  $K$  и  $n$  определяются методами регрессионного анализа. Для условий Новоширокинского рудника по данным работы [1], графическое изображение (1) представлено на рис. 1.

Следует отметить, большой разброс экспериментальных данных относительно линии регрессии, особенно, для пунктов регистрации вблизи охраняемого объекта. В первую очередь это связано с тем, что из велосиграм для одного сейсмического события берется только максимальное значение модуля скорости смещения, а другая измерительная информация не используется. Такой подход, по-видимому, приводит к тому, что в выражении для приведенного расстояния возможно использова-

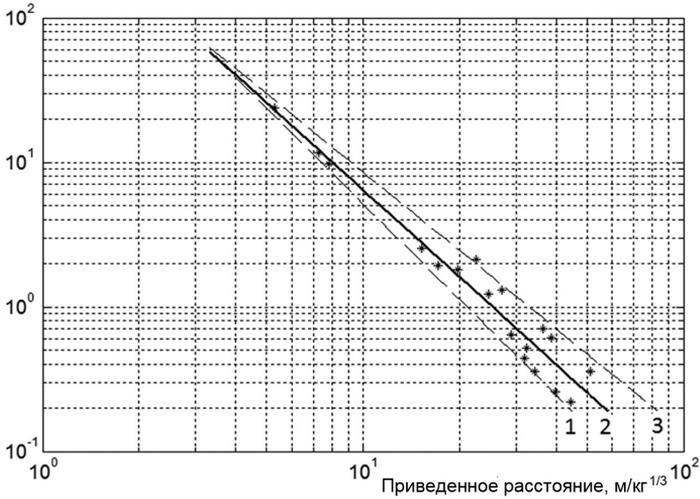


Рис. 1. График зависимости скорости смещения от приведенного расстояния: \* – экспериментальные данные. Границы области достоверного определения параметров сейсмических колебаний: 1 – график уравнения с параметрами  $K = 820$ ,  $n = 2,2$ ; 2 – график уравнения с параметрами  $K = 540$ ,  $n = 1,8$ ; 3 – график уравнения регрессии с параметрами  $K = 652$ ,  $n = 2,0$

ние степени для массы заряда, отличной от 1/3 [7]. Повышение точности обработки велосиграмм достигается применением предварительной фильтрацией их [6], а также анализом результатов оценкой их по известным статистическим критериям, позволяющих исключить влияние систематических ошибок [2].

Если рассматривать каждый массовый взрыв как последовательность единовременно взрываемых зарядов [5], то приведенное расстояние становится ступенчатой функцией времени, а выражение (1) позволяет определить сейсмическое действие каждой группы зарядов, соответствующей одной и той же ступени замедления. В этом случае формула (1) становится функцией времени, то есть появляется возможность моделирования сейсмических процессов, различающихся по времени начала действия. Такими процессами при проведении массовых взрывов на подземных рудниках и наблюдении на земной поверхности является сейсмическое действие продольных и поверхностных волн. Продольные волны распространяются в направлении сейсмического луча от источника взрыва, т.е. по наикратчайшему пути. Поверхностные волны формируются в результате трансформации продольных волн на земной поверхности, определим их как поверхностные волны I-го типа, и на поверхностях горных выработок, поверхностные волны II-го типа. Тогда выражение, моделирующее сейсмическое действие введенных типов волн, примет следующий вид:

$$v_{np} = K_1 \cdot [\bar{R}_1(t)]^{-n_1} + K_2 \cdot [\bar{R}_2(t - t_3)]^{-n_2}, \quad (2)$$

где  $\bar{R}_1(t) = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}}$ ;  $\bar{R}_2(t) = \frac{R_g}{Q}$ ,  $R_b$  — длина пути распространения поверхностных волн II-го типа по горным выработкам;  $t_3$  — время задержки прихода поверхностных волн II-го типа относительно прихода продольных волн в пункт наблюдения;  $K_1$ ,  $K_2$  — коэффициенты сейсмичности;  $n_1$ ,  $n_2$  — показатели затухания сейсмических волн. Поскольку поверхностные волны I-го типа формируются на всем пути распространения продольных волн, то их вклад в сейсмическое действие взрыва учитывается совместно со вкладом продольных волн в первом слагаемом выражения (2). Поверхностные волны II-го типа формируются в непосредственной близости от источника и распространяются по более длинному пути. Поэтому их вклад в сейсмическое действие взрыва учитывается вторым слагаемым выражения (2). Следует отметить, что поверхностные волны II-го типа распро-

страняются в горных выработках как в волноводах, т.е. характеризуются одномерным ограничением. Этим обстоятельством определяется вид выражения для приведенного расстояния  $\bar{R}_2$ . Следует ожидать большой вклад поверхностных волн II-го типа в сейсмическое действие взрыва при ведении взрывных работ на больших удалениях от охраняемых объектов.

На рис. 2 приведен график модельной функции скорости смещения для опытно-промышленного взрыва со следующими параметрами: короткозамедленное взрывание восьми групп скважинных зарядов с массами заряда взрывчатого вещества в пределах 342...601 кг (общая масса ВВ составила 3922 кг), расстояние по сейсмическому лучу 300 м, интервал замедления 50 мс. Модельные параметры составили:  $K_1 = 310$ ,  $n_1 = 2$ ;  $K_2 = 0,09$ ,  $n_2 = 1,15$ ,  $t_3 = 105$  мс (при условии, что масса заряда ВВ берется в кг, расстояние в м, скорость смещения в см/с). Следовательно, вклад поверхностных волн II-го типа в модуль скорости смещения составляет порядка половины.

Для непосредственного сопоставления модельной функции скорости смещения с экспериментальными значениями скорости смещения необходимо представление велосиграмм в виде огибающей модуля скорости смещения, отфильтрованной с помощью низкочастотного фильтра. Частота среза фильтра должна удовлетворять известному условию:

$$f_{cp} \leq \frac{1}{2\tau_3}, \quad (3)$$

где  $\tau_3$  — интервал времени короткозамедленного взрывания. Поскольку фильтр применяется одновременно к модельной и

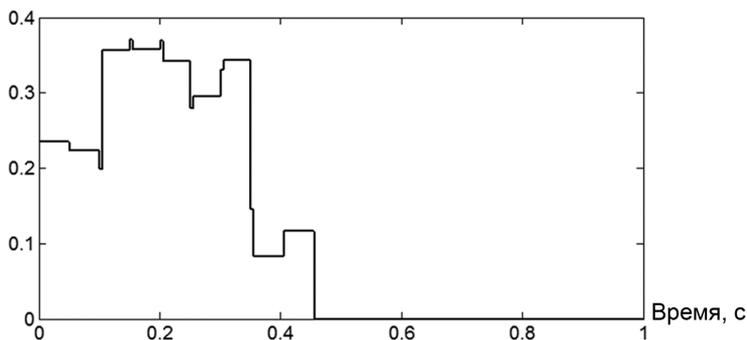


Рис. 2. График модельной функции скорости смещения для опытно-промышленного взрыва

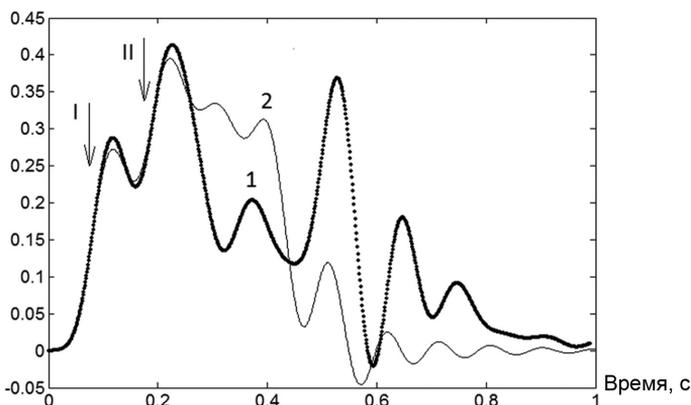


Рис. 3. Графики: 1 — огибающая экспериментальных значений скоростей смещения для опытно-промышленного взрыва; 2 — расчетная кривая скоростей смещения. I — вступление продольных и поперечных волн I-го типа; II — вступление поперечных волн II-го типа

экспериментальной функциям скорости смещения, то остальные параметры фильтра существенного значения не имеют.

На рис. 3 приведены график расчетных значений скоростей смещения, построенный с помощью модельной функции (рис. 2), и график огибающей экспериментальных значений скоростей смещения. Графики построены с помощью фильтра нижних частот с частотой среза  $f_{\text{ср}} = 10$  Гц.

Анализ графиков, приведенных на рис. 3, приводит к выводу, что дополнительный пик скорости смещения для интервалов времен 0,5...0,6 с не может быть объяснен только действием источника сейсмических волн от массового взрыва, то есть должен существовать вторичный источник сейсмических волн, связанный с самими охраняемыми объектами.

Доказательством этого служат аналогичные графики, приведенные на рис. 4, для массового взрыва с меньшими значениями параметров: короткозамедленное взрывание четырех групп скважинных зарядов с массами заряда взрывчатого вещества в пределах 375...477 кг (общая масса ВВ составила 1748 кг) с интервалом замедления 50 мс. Модельные параметры составили:  $K_1 = 50$ ,  $n_1 = 2$ ;  $K_2 = 0,105$ ,  $n_2 = 1,15$ ,  $t_3 = 130$  мс.

В случае этого взрыва вклад поперечных волн II-го типа в модуль скорости смещения является основополагающим. Однако по окончании промежутка времени, в течение которого происходит генерация сейсмических волн взрывным ис-

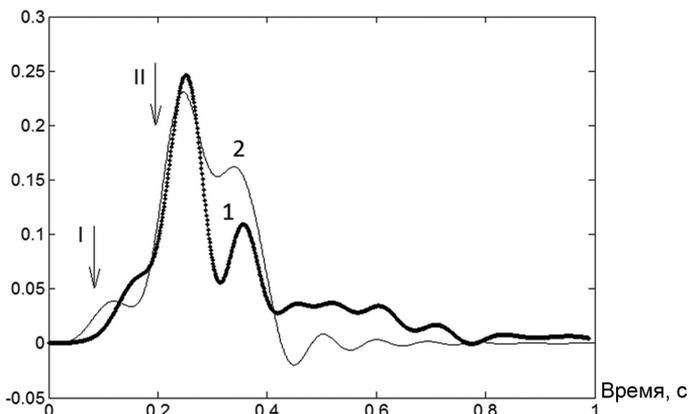


Рис. 4. Графики: 1 — оглибающая экспериментальных значений скоростей смещения для массового взрыва с общей массой ВВ — 1748 кг; 2 — расчетная кривая скоростей смещения. I — вступление продольных и поперечных волн I-го типа; II — вступление поверхностных волн II-го типа

точником, не наблюдается сейсмической активности, связанной с надшахтными сооружениями, т.е. имеет место обычная реакция охраняемых объектов на сейсмическое воздействие взрыва.

Приведенные расстояния  $\bar{R}$  групп зарядов с максимальными массами зарядов ВВ для обоих взрывов отличаются не более, чем на 7%. Это свидетельствует о том, что процесс превращения системы надшахтные сооружения-грунт в источник сейсмических колебаний носит резко нелинейный характер. Следовательно, не представляется возможным осуществить предварительный прогноз сейсмического воздействия массовых взрывов на охраняемые объекты, не проводя детального анализа сейсмического действия для каждого массового взрыва в серии массовых взрывов с увеличением массы заряда ВВ в единовременно взрываемой группе зарядов.

Оценка сейсмической обстановки перед обрушением кирпичной кладки, полученная в работе [1], практически совпадает с аналогичной оценкой с использованием формулы (2) в пересчете на группу зарядов с максимальной массой и соответствует значению модуля скорости смещения 1,3 см/с. Это сравнительно малое значение скорости смещения сейсмического действия взрыва, способного вызвать столь катастрофические последствия, особенно для горных предприятий, ведущих взрывные работы.

Таким образом, оценка уровня сейсмического воздействия на наземные сооружения подземных рудников при ведении взрывных работ должна базироваться не только на известных методиках, но и на учете относительного вклада поверхностных и объемных сейсмозврывных волн в модуль вектора скорости смещения грунта. При этом под предельным уровнем сейсмического воздействия необходимо считать достижение сейсмического отклика системы здания-грунт до уровня сейсмического воздействия источника сейсмозврывных волн.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемов В. А., Виноградов Ю. И., Холодильов А. Н., Густов С. В., Щербаков Н. Я.* Исследование сейсмобезопасных условий производства массовых взрывов на руднике ОАО «Ново-Широкинский рудник» // Взрывное дело. – 2011. – № 105/62. – С. 239–252.

2. *Новиньков А. Г., Протасов С. И., Гуков А. С.* Практика применения регрессионного анализа для определения сейсмобезопасных расстояний при массовых промышленных взрывах // Взрывное дело. – 2012. – № 108/65. – С. 333–347.

3. *Пергамент В. Х., Овчаров Ю. Е., Гончаров Е. В.* Интенсивность по сейсмической шкале, скорость колебаний и эквивалентные приведенные расстояния при взрывах // Записки горного института. – 2001. – Т. 148(2). – С. 84–90.

4. *Технические правила ведения взрывных работ в энергетическом строительстве.* – М.: Гидроспецпроект, 1997. – 220 с.

5. *Kholodilov A., Gospodarikov A., Miasnikov A.* A new approach in seismic safety evaluation for blasting operations performed by Russian mining companies // 14th SGEM GeoConference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Conference Proceedings. Bulgaria, 17–26 June 2014. V. 3. – P. 3–9.

6. *Jinxing Lai, Haobo Fan, Jianxun Chen, Junling Qiu, and Ke Wang.* Blasting Vibration Monitoring of Undercrossing Railway Tunnel Using Wireless Sensor Network // International Journal of Distributed Sensor Networks. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/703980> (дата обращения 07.12.2015).

7. *Mehdi Hosseini, Mehdi Seifi Baghikhani.* Analysing the Ground Vibration Due to Blasting at Alvand Qoly Limestone Mine // International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing. – 2013. 2(2).-P.17–23. URL: <http://article.sapub.org/10.5923.j.mining.20130202.01.html> (дата обращения 07.12.2015). **ПЛАЭ**

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Холодильов Андрей Николаевич* – кандидат физико-математических наук, доцент, e-mail: [kholodilov@mail.ru](mailto:kholodilov@mail.ru),

*Господариков Александр Петрович* – доктор технических наук, профессор, проректор, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».

**A.N. Kholodilov, A.P. Gospodarikov**  
**METHODOLOGY OF THE ASSESSMENT**  
**OF SEISMIC SAFETY OF EXPLOSIONS EXECUTED**  
**IN UNDERGROUND MINES NEAR HEAPSTEDS**

Questions of ensuring seismic safety of the heapsteds, when explosive works are conducting on underground mines at early development stages of a mineral deposit, are considered. Influence of the surface seismic waves propagating on mine workings as a result of seismic action of explosion is analyzed. The possible reasons of catastrophic consequences as a result of weak seismic influences are discussed. The new criterion of an assessment of seismic safety of the protected objects is offered. This criterion corresponds to achievement of level of a response of system soil – a land construction to the level of seismic impact of explosive works.

Key words: seismic safety, heapsted, seismic waves, particle velocity, blasting vibration, scaled distance, blasting.

#### **AUTHORS**

*Kholodilov A.N.*<sup>1</sup>, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor, e-mail: kholodilov@mail.ru,

*Gospodarikov A.P.*<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector,

<sup>1</sup> National Mineral Resource University «University of Mines», Scientific Center for Geomechanics and Mining Problems, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

#### **REFERENCES**

1. Artemov V.A., Vinogradov Yu.I., Kholodilov A.N., Gustov S.V., Shcherbakov N.Ya. *Vzryvnoe delo*. 2011, no 105/62, pp. 239–252.
2. Novin'kov A.G., Protasov S.I., Gukov A.S. *Vzryvnoe delo*. 2012, no 108/65, pp. 333–347.
3. Pergament V. Kh., Ovcharov Yu. E., Goncharov E. V. *Zapiski gornogo instituta*. 2001, vol. 148(2), pp. 84–90.
4. *Tekhnicheskie pravila vedeniya vzryvnykh работ v energeticheskom stroitel'stve* (Technical rules blasting in the energy construction), Moscow, Gidrospeetsproekt, 1997, 220 p.
5. Kholodilov A., Gospodarikov A., Miasnikov A. A new approach in seismic safety evaluation for blasting operations performed by Russian mining companies. *14th SGEM GeoConference on Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining. Conference Proceedings*. Bulgaria, 17–26 June 2014. V. 3. P. 3–9.
6. Jinxing Lai, Haobo Fan, Jianxun Chen, Junling Qiu, and Ke Wang. Blasting Vibration Monitoring of Undercrossing Railway Tunnel Using Wireless Sensor Network. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/703980> (accessed 07.12.2015).
7. Mehdi Hosseini, Mehdi Seifi Baghikhani. Analysing the Ground Vibration Due to Blasting at Alvand Qoly Limestone Mine. *International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing*. 2013. 2(2).-P.17–23. URL: <http://article.sapub.org/10.5923.j.mini.ng.20130202.01.html> (accessed 07.12.2015).

