

УДК 622.235:519.7

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ВЗРЫВНЫХ РАБОТ, ПРОВОДИМЫХ НА КАРЬЕРЕ, НА ПОДЗЕМНЫЕ  
ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*В.А. Коваленко, М.А. Райымкулов, Д.А. Воробьев*

Приведены результаты численного моделирования сейсмического воздействия на сооружения, в частности на подземные горные выработки, при различных способах инициирования заряда.

*Ключевые слова:* техногенная сейсмика; численное моделирование; устойчивость.

---

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE SEISMIC IMPACT OF BLASTING  
AT THE QUARRY ON THE UNDERGROUND MININGS USING  
A METHOD OF NUMERICAL SIMULATION**

*V.A. Kovalenko, M.A. Raiymkulov, D.A. Vorobev*

It presents the results of numerical modeling of the seismic effects on constructions, specifically on underground minings, with different methods of the blast initialization.

*Key words:* technogenic seismic; numerical modeling; stability.

**Введение.** Развитие горнодобывающих предприятий, расширение границ ведения горных работ, увеличение переработки объемов пород и руд, увеличение массы заряда взрывчатых веществ приводит к повышению рисков аварийных ситуаций в зонах, примыкающих к горным работам. В качестве примера можно привести разрез “Заречный”, ОАО “СУЭК – Кузбасс”, где в непосредственной близости от открытых работ располагаются подземные горные выработки. Поэтому перед производственными разрезами стоит задача правильного определения безопасных параметров взрывных работ и оценки сейсмического воздействия на охраняемые объекты [1, 2]. В статье сделана попытка провести сравнительный анализ влияния различных параметров взрывных работ на сейсмическую опасность.

Различают несколько методов оценки сейсмического воздействия горных работ на близлежащие сооружения: аналитический метод, инженерная сейсмометрия и численное моделирование. В данной работе использован метод численного моделирования. Возможность моделирования сейсмического воздействия на стадии проекта до проведения взрывных работ позволяет предварительно оценить нагрузки на охраняемые объекты и опре-

делить параметры взрывных работ, обеспечивающих щадящее сейсмическое воздействие. Это также позволяет разрабатывать технологии наиболее безопасного, адаптивного способа ведения взрывных работ на карьере.

**Подготовка цифровой модели.** Для проведения вычислительных экспериментов была разработана примерная 3-мерная цифровая модель блока размером  $1000 \times 800 \times 600$  м с 40 скважинами глубиной 10 м и учетом физико-механических свойств пород. Под взрываемым блоком на глубине 70 м расположены горные выработки – шахта “Талдинская-Западная-2” (рисунок 1). Разбиение пространственной модели массива на конечные элементы осуществлялось с использованием специального редактора. Были заданы области сгущения конечно-элементной сетки вокруг скважин и подземной выработки, что позволило получить более точные результаты в области сгущения сетки (рисунок 2). Конечно-элементная модель исследуемого участка состояла из 80 тыс. узлов и 5 млн тетраэдральных элементов.

Задание геологической структуры модели и динамических нагрузок осуществлялось в специально разработанном интерактивном редакторе

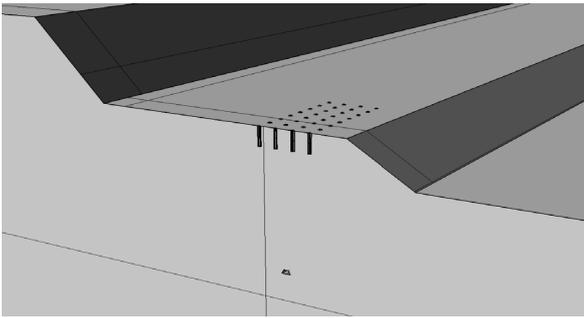


Рисунок 1 – Пространственная модель взрывающегося блока и подземной выработки

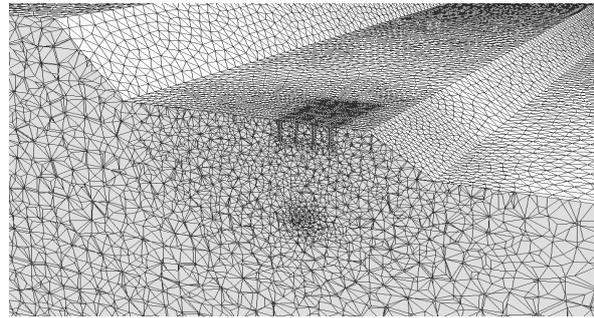


Рисунок 2 – Тетраэдральная пространственная модель взрывающегося блока и подземной выработки

*ImpactMaker*. Модель была разбита на геологические домены, каждому из которых присвоен определенный тип породы. Модель позволяет задавать такие физико-механические характеристики, как удельная плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, предел текучести, вязкость, коэффициент пластического упрочнения и т. д. [3].

**Геологическое строение массива.** Разрез “Заречный” по данным геологической службы в целом характеризуется довольно простой тектонической обстановкой и геологическим строением [1]. Горный массив представлен слоистой структурой алевролита, песчаника и угля.

**Модель среды.** Распространение динамических полей в ближней и дальней зоне при взрыве в горном массиве можно описать в рамках упруговязкопластичной модели Бигмана. Данная модель является упругой для области напряжений, пластичной при и записывается в следующем виде [4]:

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E}, & \text{если } \sigma < \sigma_B; \\ \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma - \sigma_B}{\eta}, & \text{если } \sigma \geq \sigma_B. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $\sigma$  – напряжение;  $\sigma_B$  – предельное напряжение;  $\eta$  – динамическая вязкость;  $\varepsilon$  – деформация;  $E$  – модуль Юнга.

**Вычислительная схема.** Расчет временных последовательностей абсолютных смещений каждого из узлов конечно-элементной модели под действием динамических нагрузок осуществлялся решением пространственно-дискретизированных уравнений структурной динамики с использованием явных методов:

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{f\}, \quad (2)$$

где  $\{\ddot{u}\}, \{\dot{u}\}, \{u\}$  – векторы ускорений, скоростей и смещений;  $[M], [C], [K]$  – матрицы масс, демпфирования и жесткости;  $\{f\}$  – вектор нагрузок.

Метод иерархической декомпозиции модельной области и технологии параллельных вычислений, применяемые в программе *AdventureImpact*, обеспечивают высокую производительность при использовании на кластерных системах. Таким образом, физико-механические свойства горных пород в рассматриваемой модели определены через модуль Юнга, коэффициент Пуассона, плотность породы и динамическую вязкость.

Выходными данными программы являются величины смещений в узлах конечно-элементной модели для различных моментов времени.

**Численные эксперименты и результаты.** С целью обеспечения достоверности расчетной модели был проведен тестовый численный расчет, в рамках которого проводилась настройка параметров геомеханической модели. Для сравнения использованы сведения о максимальных значениях скоростей и ускорений, полученных сейсмоприемниками, установленными в подземных горных выработках [1]. Отклонение расчетных данных от натуральных измерений после настройки составляло не более 7 %.

Следующая серия численных экспериментов была проведена для сравнения сейсмического воздействия при различных схемах взрывания. Сведения о параметрах выбранных схем взрывания приведены в таблице 1. Для проведения численных экспериментов выбраны следующие способы инициирования заряда: мгновенный, короткозамедленный взрыв (КЗВ) порядный и поскважинный. В качестве моделируемого взрывчатого вещества (ВВ) был выбран Эмульсолит А20: плотность 1,4 г/см<sup>3</sup>, скорость детонации 4800 м/с, удельная теплота взрыва 3 МДж/кг. Для КЗВ интервалы замедления приняты 25 мс в соответствии с применяемым временем замедления на производстве.

В результате расчетов получены графики смещений, скоростей и ускорений во времени в выбранной точке на кровле подземной выработки под

Таблица 1 – Параметры моделируемых взрывов

| № п/п | Способ инициирования заряда | Тип моделир. ВВ | Кол-во скважин/ масса заряда в скважине, кг | Кол-во одновременно взрывающихся скважин/ масса единовремен. взрыв. ВВ, кг | Интервалы замедлений, мс | Глубина скважины, м |
|-------|-----------------------------|-----------------|---|--|--------------------------|---------------------|
| 1     | Мгновенное взрывание        | Эмульсолит А20  | 40/167                                      | 40/6680  | 0                        | 10                  |
| 2     | КЗВ, порядное               | Эмульсолит А20  | 40/167                                      | 4/668  | 25                       | 10                  |
| 3     | КЗВ, поскважинное           | Эмульсолит А20  | 40/167                                      | 1/167  | 25                       | 10                  |

взрываемым блоком на минимальном расстоянии от взрывающегося блока – 70 м. На рисунке 3 представлены сравнительные графики при различных схемах взрывания.

Максимальные значения смещений в выбранной точке на кровле подземной выработки составили:

- 14,3 мм – при мгновенном взрывании;
- 7,2 мм – при КЗВ, порядной схеме взрывания;
- 4 мм – при поскважинном взрывании.

Максимальные значения скоростей в выбранной точке на кровле подземной выработки составили:

- 0,57 м/с – при мгновенном взрывании;
- 0,23 м/с – при КЗВ, порядной схеме взрывания;
- 0,17 м/с – при поскважинном взрывании.

Максимальные значения ускорений в выбранной точке на кровле подземной выработки составили:

- 57 м/с<sup>2</sup> – при мгновенном взрывании;
- 30 м/с<sup>2</sup> – при КЗВ, порядной схеме взрывания;
- 30 м/с<sup>2</sup> – при поскважинном взрывании.

Также были рассчитаны распределения максимальных значений смещений, скоростей и ускорений вдоль подземной выработки, что дает более информативную картину о распределении сейсмического воздействия.

Наибольшие значения максимальных смещений вдоль кровли подземной выработки составили:

- 15 мм – при мгновенном взрывании;
- 9 мм – при КЗВ, порядной схеме взрывания;
- 5 мм – при поскважинном взрывании.

Наибольшие значения максимальных скоростей вдоль кровли подземной выработки составили:

- 0,6 м/с – при мгновенном взрывании;
- 0,46 м/с – при КЗВ, порядной схеме взрывания;
- 0,23 м/с – при поскважинном взрывании.

Наибольшие значения максимальных ускорений вдоль кровли подземной выработки составили:

- 60 м/с<sup>2</sup> – при мгновенном взрывании;
- 51 м/с<sup>2</sup> – при КЗВ, порядной схеме взрывания;
- 35 м/с<sup>2</sup> – при поскважинном взрывании.

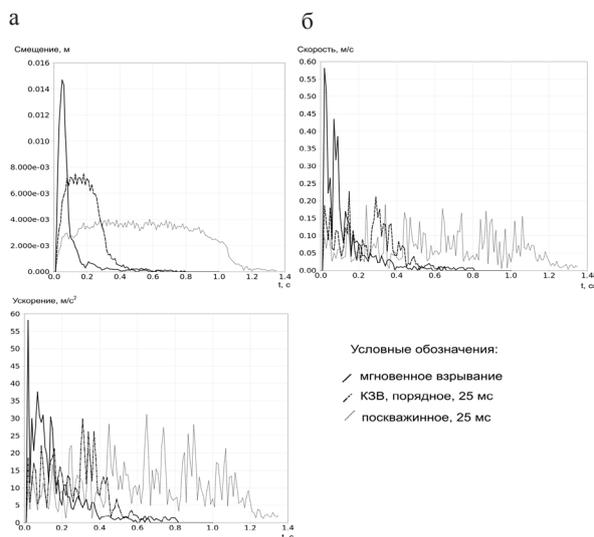


Рисунок 3 – Сравнение сейсмических колебаний: смещений (а), скоростей (б) и ускорений (в) в точке на кровле выработки

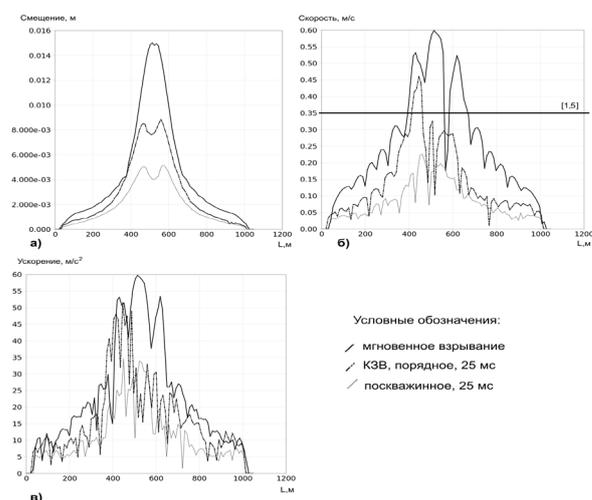


Рисунок 4 – Сравнительные графики распределения максимальных значений смещений (а), скоростей (б) и ускорений (в) вдоль подземной выработки

На рисунке 4 представлены сравнительные графики распределения максимальных значений смещений, скоростей и ускорений вдоль подземной выработки при различных схемах взрывания.

Численное моделирование показывает, что на характер распределения сейсмических максимальных скоростей оказывают влияние интерференционные процессы при взрывании, геологическая структура массива, а также ориентация взрыва к охраняемому объекту.

Как известно [5], максимально допустимая скорость для подземной выработки в рассматриваемых породах составляет 0,35 м/с. На рисунке 4 видно, что скорость смещений на кровле подземной выработки при поскважинном взрывании меньше максимально допустимой скорости.

**Выводы.** Показана возможность проведения оценки сейсмического воздействия массовых взрывов на охраняемые сооружения. Проведен сравнительный анализ влияния параметров взрывных работ на характер сейсмической нагрузки. Определен сейсмически безопасный способ ведения взрывных работ.

Проведение численных экспериментов сейсмического воздействия массовых взрывов на подземные выработки позволило сделать вывод, что наиболее щадящим является поскважинное взрывание, поскольку значения смещений, скоростей

и ускорений при поскважинном взрывании меньше, чем при мгновенном взрывании, и КЗВ – при порядном. Скорость смещений при поскважинном взрывании меньше максимально допустимой скорости для подземных выработок [1, 5].

#### *Литература*

1. Заключение экспертизы промышленной безопасности № 42-2009 в части анализа риска горных производств и объектов “Оценка сейсмического действия массовых взрывов разреза “Заречный” ОАО “СУЭК-КУЗБАСС” на подземные горные выработки шахты “Талдинская-Западная-2” ОАО “СУЭК-КУЗБАСС”/ КУЗБАСС-НИИОГР. Кемерово, 2009. 55 с.
2. Мосинец В.Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах / В.Н. Мосинец. М.: Недра, 1976. 271 с.
3. Усманов С.Ф. Численное моделирование сейсмического воздействия на борт карьера / С.Ф. Усманов, В.А. Коваленко, В.Г. Долгушев // Вестник ККРСУ. 2009. № 11. С. 189–193.
4. Комир В.М. Повышение эффективности действия взрыва в твердой среде / В.М. Комир, В.В. Воробьев, В.Н. Чебенко. М.: Недра, 1988. 209 с.
5. Богацкий В.Ф. Прогноз и ограничение сейсмической опасности промышленных взрывов / В.Ф. Богацкий // Взрывное дело. Сб. № 85/42. Сейсмика промышленных взрывов. М.: Недра, 1983. С. 201–213.