

УДК 622.271:[622.235:550.834.18](476)

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА СЕЙСМИКИ ВЗРЫВОВ НА ОТКРЫТЫХ РАЗРАБОТКАХ

Оника С.Г., Войтенко В.С., Халявкин Ф.Г. (УО «Белорусский национальный технический университет», г. Минск, Беларусь)

*В статье представлены современные методы прогноза сейсмики горных взрывов с использованием эмпирических и вероятностных моделей.*

### Введение

Основной целью прогноза сейсмических колебаний, вызываемых взрывами, является определение их вероятной интенсивности, с которой связываются возможные разрушения, вызываемые сейсмическими волнами. Большое значение прогнозирования интенсивности землетрясений обусловлено:

- развитием техники и технологии горных работ;
- приближением взрывов к охраняемым объектам;
- проблемами рациональной застройки территорий, подверженных сейсмическим колебаниям;
- имеющимися случаями повреждений объектов от сотрясений;
- изменениями условий производства взрывов.

Сейсмические волны представляют собой колебания земной поверхности, параметры которых закономерно изменяются во времени и пространстве. По своему действию на среду сейсмические волны могут быть неупругими и упругими [1-13]. Если при распространении в среде сейсмических волн вызываемые ими напряжения превышают предел упругости, то деформации среды носят характер необратимых. В частности, в водонасыщенных и слабых грунтах трещины возникают уже при интенсивности колебаний в VII баллов. На некотором удалении от очага взрыва сейсмические волны имеют характер упругих волн, т.е. по окончании колебательного процесса частицы возвращаются в положение равновесия, а связь между напряжениями и деформациями подчиняется закону Гука.

Существуют различные определения понятия сейсмических волн и их источника – сейсмического очага. В частности, В.Н. Мосинец и другие специалисты под сейсмическим очагом понимают объем породы, в котором под действием взрыва развиваются необратимые деформации и на границе которого напряжения и деформации снижаются до упругого предела [10]. При таком определении остается неясным как соотносить между собой возможные нарушения в грунтах и упругий характер волн. Другие исследователи отождествляют с очагом зону дробления [14] или область, в которой выделяется основное (90 %) количество энергии [2], а зону остаточных деформаций связывают с действием сейсмических волн. Я.И. Цейтлин называет зону остаточных деформаций ближней, а Ф.Ф. Аптикаев – излучателем.

Такое представление об очаге, а равно как и о сейсмических волнах, лучше согласуется с возможными последствиями землетрясений.

### Результаты исследований

Для оценки интенсивности сейсмоколебаний от взрывов по предложению М.А. Садовского широко используется метод подобия, в соответствии с которым существует пропорциональная зависимость между условным радиусом заряда и сейсмобезопасным расстоянием. Скорость колебаний, которая характеризует интенсивность сейсмоволн по М.А. Садовскому [15], определяется по формуле:

$$v = K \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^n,$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности;  
 $Q$  – масса одновременно взрывающегося заряда, кг;  
 $r$  – расстояние, м;  
 $n$  – показатель степени.

Предложенная изначально для сосредоточенных зарядов мгновенных взрывов формула и ее аналоги применяются многими исследователями в качестве основы для оценки короткозамедленного взрывания.

Однако в оценке сейсмозффекта при короткозамедленном взрывании имеют место различные концепции, расхождения которых связаны с выбором величины взрывающегося заряда, принимаемого во внимание при определении сейсмического эффекта взрывных работ [16, 17].

Из двух подходов в оценке сейсмичности взрывов, в соответствии с которыми при определении силы сотрясений превалирующая роль отводится общей массе взрывающегося взрывчатого вещества (ВВ) одними исследователями и ее части, взрывающейся на ступень замедления другими исследователями, в конечном итоге, признанным большинством является второе направление. Тем не менее полного отражения в официальной нормативной документации эта концепция не получила.

В Единых правилах безопасности при взрывных работах при определении сейсмобезопасных расстояний предлагается наряду с массой заряда на ступень замедления учитывать и общую массу взрывающегося ВВ [5].

Согласно приведенной в Единых правилах инструкции при одновременном взрывании  $N$  зарядов ВВ общей массой  $Q$  со временем замедления между взрывами каждого заряда не менее 20 мс, определение безопасных расстояний производится по формуле:

$$r_c = K_r K_c \frac{\alpha}{N^{1/4}} Q^{1/3}, \quad (1)$$

где  $K_r$ ,  $K_c$  и  $\alpha$  – эмпирические коэффициенты;  
 $N$  – число групп зарядов;  
 $Q$  – общая масса взрывающегося ВВ.

Учитывая, что в правой части формулы (1) содержатся зависимые величины, выразим  $Q = Q_{гр} N$ , где  $Q_{гр}$  – масса взрывающегося ВВ на ступень замедления и представим (1) в виде равносильного выражения:

$$r_c = K_r K_c \alpha N^{0,08} Q_{гр}^{1/3}. \quad (2)$$

Из анализа формулы видно, что влияние на сейсмический эффект собственно общей массы взрываемого ВВ незначительно, так как с ростом  $N$  увеличение сейсмобезопасного расстояния происходит медленно.

Учитывая эмпирическую природу рассматриваемых формул и точность сейсморегистрирующей аппаратуры, характеризующейся погрешностью измерений 10-15 %, можно с уверенностью признать излишность уточнений, связанных с учетом общей массы взрывааемых зарядов. Из теории ошибок следует, что при относительной погрешности в определении сейсмобезопасного расстояния 10-15 %, показатель степени при  $N^{0,08}$  нельзя определить с точностью до 3-го знака и, учитывая порядок степени 0,08, ее можно признать равной нулю, в этом случае  $N=1$ . Тогда сейсмобезопасное расстояние оказывается независимым от общей массы взрываемого заряда, что подтверждается практикой крупномасштабных взрывов на карьерах.

Рассмотренные расхождения в оценке роли общей массы взрываемого ВВ не исчерпывают всего спектра альтернативных подходов в создании моделей сейсмичности горных взрывов.

Сейсмический эффект при короткозамедленном взрывании Институт физики Земли и ЦПЭС «Союзвзрывпрома» связывают со средней массой ВВ в группе [9, 14]:

$$v = \frac{K}{\sqrt{N}} \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{1,5},$$

где  $Q$  – общая масса взрываемого ВВ;

$N$  – число взрывааемых групп зарядов.

В этом легко убедиться путем несложных преобразований приведенной формулы, учитывая, что  $Q = Q_{гр} N$ , где  $Q_{гр}$  – средняя масса ВВ в группе.

Многие сейсмологи при прогнозе интенсивности сейсмоколебаний принимают во внимание не средний, а максимальный вес заряда на ступень замедления. Известны публикации по этому вопросу Л. Дон Лита, А.Б. Фадеева и других [3, 17]. При этом не все исследователи применяют метод подобия. В частности, в модели Горного бюро США влияние массы взрываемого заряда и расстояния рассматриваются независимо. Для определения максимальной амплитуды сейсмических волн на наносах при весе ВВ в группе от 450 до 4500 кг и расстоянии от 150 до 1800 м Горное бюро США рекомендует формулу:

$$A = \frac{Q^{2/3}}{100} (0,07e^{-0,00143r} + 0,001),$$

где  $A$  – максимальная амплитуда в дюймах;

$Q$  – вес заряда ВВ в фунтах;

$r$  – расстояние в футах.

Кроме массы заряда и расстояния на величину скорости сейсмических колебаний оказывают влияние многие факторы, к которым относятся свойства пород в основании охраняемых объектов и на пути распространения волн, топография местности,

глубина взрыва, режим взрывания и другие параметры. В способах оценки этих и других факторов нет единого подхода. Попытки теоретического решения задачи существенно расширяют существующие представления о роли отдельных факторов, однако в силу их известной схематизации не могут иметь обобщающего значения.

Преобладающее распространение среди методов оценки сейсмического эффекта взрывов и определения на их основе сейсмобезопасных параметров получили формулы, учитывающие влияние различных факторов набором коэффициентов [4, 7]. Достоинством этих моделей является возможность прямого определения влияния отдельных факторов на сейсмический эффект взрывов. Однако мнения исследователей в оценке их роли противоречивы и не всегда содержат убедительные обоснования достоверности предлагаемых моделей.

Большое число эмпирических формул, справедливых для определенных условий, со всей очевидностью характеризует их невысокую надежность в широком диапазоне горно-технических условий выполнения взрывных работ. Именно это и предопределило ограничение области применения методики, принятой, в частности, в Единых правилах безопасности при взрывных работах – простейшими условиями производства взрывов.

Случайный характер изменения влияющих факторов послужил причиной создания вероятностных моделей сейсмичности горных взрывов. Известны работы в этом направлении Л.Б. Писаревой, О.П. Шкребы, Б.В. Позднякова и других [11, 12, 18]. Общей идеей методов является замена совокупности эмпирических коэффициентов, отражающих влияние отдельных факторов, теоретическим распределением коэффициента интенсивности, которое комплексно учитывает все многообразие влияющих параметров, действие которых в рассматриваемых моделях носит неопределенный характер. Разными исследователями отмечалось соответствие эмпирических распределений теоретическим: гамма-распределению и распределению Вейбулла, бета-распределению, кривым Пирсона I и III типов. Многовариантность решений, связанных с применением для описания изучаемого процесса различных типов распределений, объясняется сложностью задачи и может быть предопределено условиями производства взрывов и их параметрами.

Известные вероятностные модели основываются на методе подобия, что можно считать приемлемым приближением для короткозамедленных взрывов. Допускаемая идеализация принципа подобия взрывов при применении вероятностных методов компенсируется прогнозируемой вариацией коэффициента пропорциональности, характеризующего влияние неопределенных факторов.

Наиболее разработана и доведена до инженерной методики модель Л.Б. Писаревой, развитая в дальнейшем НИИКМА (Л.В. Сафонов, О.П. Шкреба).

Прогноз скорости сейсмических колебаний предлагается ими выполнять по формуле:

$$v = \bar{K} K_{\Pi} \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{r} \right)^{1,5},$$

где  $\bar{K}$  – среднее значение коэффициента «сейсмичности»;

$K_{\Pi}$  – коэффициент Пирсона.

Значения коэффициента Пирсона принимаются по специальным таблицам Фостера, осуществившим табулирование кривой Пирсона III типа – теоретической модели распределения коэффициента сейсмичности.

К основным недостаткам данного способа прогноза сейсмичности взрывов относится обязательность предварительных сейсмометрических замеров, а также ограничение способов определения вероятного значения  $K_{II}$  рамками вспомогательных таблиц Фостера. Модели, использующие распределения других типов, находятся в стадии разработки или не доведены до инженерных методик.

Если расстояние до взрыва становится соизмеримым с линейными размерами зарядов, их групп или расстояниями между одновременно взрывающимися блоками, то определяющее влияние на сейсмический эффект оказывает не вся масса ВВ в группе (масса одновременно взрывающихся зарядов), а только ее часть.

Основой для учета пространственной рассредоточенности зарядов является метод эффективного заряда, предложенный М.А. Садовским, который в дальнейшем получил развитие в работах Н.А. Кокарева, Я.И. Цейтлина, А.Е. Азарковича и других исследователей [1, 14, 15]. Ими получены простые решения для частных случаев при определенном расположении точек наблюдения относительно линейных систем рассредоточенных зарядов. Однако они не применимы для точек наблюдения, линия кратчайшего расстояния от которых не совпадает с перпендикуляром к линии удлинённого заряда или, если эта точка не принадлежит фланговому профилю. Кроме того, известные решения по линейным зарядам или их системам допускают упрощения, увеличивающие ошибку прогноза. В частности, произвольное направление вектора плотности энергии относительно касательной к эквипотенциальной линии в данной точке, что обуславливает необходимость дальнейшего совершенствования методов оценки сейсмического эффекта рассредоточенных зарядов.

### Заключение

При ведении взрывных работ прогноз сейсмического эффекта целесообразно выполнять на основе использования обоснованных теоретически и апробированных на практике эмпирических и вероятностных моделей. Дальнейшее развитие методов прогноза возможно на основе совершенствования методов оценки сейсмического эффекта рассредоточенных зарядов.

### Список использованных источников

1. Азаркович, А.Б. Взрывные работы вблизи охраняемых объектов / А.Б. Азаркович, М.И. Шуйфер, В.А. Тихомиров. – М.: Недра, 1984. – 212 с.
2. Аптикаев, Ф.Ф. Сейсмические колебания при землетрясениях и взрывах / Ф.Ф. Аптикаев. – М.: Наука, 1969. – 104 с.
3. Дон Лит, Л. Сейсмическое действие взрыва / Л. Дон Лит. – М.: Госгортехиздат, 1963. – 85 с.
4. Эффективный метод снижения сейсмичности взрывов на горных предприятиях / П.Э. Зурков [и др.] // Сейсмика взрывов и некоторые вопросы механики горных пород / П.Э. Зурков [и др.]. – Магнитогорск, 1965. – С. 6-13.
5. Единые правила безопасности при взрывных работах. – Киев: Норматив, 1992. – 172 с.

6. **Кокарев, Н.А.** Исследование воздействия взрывов на устойчивость целиков и потолочин (на примере Златоустовского и Южно-Уральских бокситовых рудников): дис. ... канд. техн. наук / Н.А. Кокарев. – Магнитогорск, 1969. – 208 л.
7. **Кузнецов, Г.В.** Сейсмическая безопасность сооружений при взрывных работах в карьерах / Г.В. Кузнецов // Горный журнал. – 1971. – № 4. – С. 47-49.
8. **Медведев, С.В.** Инженерная сейсмология / С.В. Медведев. – М.: Гос. изд-во литер. по строительству, архитектуре и стройматериалам, 1962. – 283 с.
9. **Медведев, С.В.** Сейсмика горных взрывов / С.В. Медведев. – М.: Недра, 1964. – 187 с.
10. **Мосинец, В.Н.** Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах / В.Н. Мосинец. – М.: Недра, 1976. – 262 с.
11. **Писарева, Л.Б.** Оценка сейсмики взрыва методами математической статистики / Л.Б. Писарева // Горный журнал. – 1964. – № 7. – С. 57-64.
12. **Поздняков, Б.В.** Распределение амплитуд сейсмозрывных колебаний / Б.В. Поздняков // Сейсмика промышленных взрывов. – 1983. – С. 31-39.
13. **Саваренский, Е.Ф.** Элементы сейсмологии и сейсмометрии / Е.Ф. Саваренский, Д.П. Кирнос. – М.: ГИИТЛ, 1955. – 825 с.
14. **Цейтлин, Я.И.** Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов / Я.И. Цейтлин, Н.И. Смолий. – М.: Недра, 1981. – 192 с.
15. **Садовский, М.А.** Простейшие приемы определения сейсмической опасности массовых взрывов / М.А. Садовский. – М.-Л.: АН СССР, 1946. – 47 с.
16. **Сафонов, Л.В.** Сейсмический эффект взрыва скважинных зарядов / Л.В. Сафонов, Г.В. Кузнецов. – М.: Наука, 1967. – 102 с.
17. **Фадеев, А.Б.** Дробящее и сейсмическое действие взрывов на карьерах / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1972. – 133 с.
18. **Сафонов, Л.В.** Вероятностный метод оценки сейсмического эффекта промышленных взрывов / Л.В. Сафонов, О.П. Шкреба. – М.: Наука, 1970. – 61 с.

---

**Onika S.G., Voitenko V.S., Khalyavkin F.G.**

**Modern methods for forecasting of rock burst seismic at the open minings**

*The article presented modern methods for forecasting of rock burst seismic using empirical and probabilistic models.*

Поступила в редакцию 23.01.2012 г.