

Таблица 2. Сравнительные (опытные* и расчетные) параметры адсорбции водяного пара древесным углем и дымным порошком

Обозначение параметра	Древесный уголь		Дымный порошок	
	α_m , ммоль/г	1,6*	2,30	0,27*
$\alpha_{0,6}$, ммоль/г	2,85*	4,10	0,42*	0,61

* – параметры получены с помощью весов Мак-Бена.

Анализ результатов показывает, что если при хранении дымного пороха количество кислородсодержащих групп на поверхности древесного угля и достигнет предельного значения 2,30 ммоль/г за счет хемосорбции кислорода, то содержание влаги в дымном порошке при $p/p_s = 0,6$ не превысит 0,61 ммоль/г (1,10 %).

Таким образом, фактором, связывающим процессы химического и физического старения дымного пороха, является наличие на поверхности угля ПАЦ (кислородсодержащих групп). При химическом старении их количество увеличивается, что приводит к росту ПАЦ, сорбции водяного пара и потере физической стабильности. Однако расчет показывает, что при максимально возможном количестве ПАЦ при хранении содержание влаги в дымном порошке не превышает предельно допустимого значения 1,13 %.

1. Буллер М. Ф. О старении дымного пороха // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія “Гірництво”: Збірник наукових праць. – Київ. – 2002. – Вип. 6. – С. 57–63.

2. Вартанян Р. М., Волощук А. М. Механизм адсорбции молекул воды на углеродных адсорбентах // Успехи химии. – 1995. – Т. 64. – № 11. – С. 1055–1072.

3. Исследование сорбционных и ионообменных свойств окисленных углей из древесины / Д. Н. Стражеско, И. А. Тарковская, А. Н. Завьялов, А. Н. Кислицин, А. Ф. Дивнич, В. Е. Гоба / Адсорбция и адсорбенты. – К.: Наук. думка. – 1975. – Вип. 3. – С. 8–13.

4. Экспериментальные методы в адсорбции и молекулярной хроматографии / Под ред. Киселева А. В. и Древинга В. П. – М.: Изд-во МГУ, 1973. – 447 с.

5. Ефимов Л. М., Завьялов А. Н. Окисление древесного угля молекулярным кислородом // Гидролизная и лесохимическая промышленность. – 1972. – № 2. – С. 16–17.

УДК 622.235.532.2.

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ИСТОЧНИКА СЕЙСМОИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВНОМ РАЗРУШЕНИИ АНИЗОТРОПНЫХ ГОРНЫХ МАССИВОВ

*В. В. Бойко, докт. техн. наук, Н. С. Ремез, канд. техн. наук,
Т. В. Хлевнюк, асп. (ИГМ НАН Украины)*

Досліджено механізм утворення джерела сейсмовипромінювання короткосповільненого вибуху при руйнуванні анізотропних гірських порід. Наведено розрахунки радіусів сейсмовипромінювання в залежності від маси вибухової речовини та властивостей гірських масивів.

В настоящее время в горной сейсмике получили развитие методы, уменьшающие долю энергии, направленной на излучение сейсмических колебаний, что способствует более полному использованию энергии взрыва заряда взрывчатого вещества (ВВ) на полезную работу (разрушение) и, как следствие, лучшему дроблению массива пород. Это позволяет решать вопросы не изолированно, а в комплексе с задачами получения горной массы кондиционной крупности. Главным связующим звеном, позволяющим комплексно решать эти проблемы, является исходная энергия ВВ, распределение которой предопределяет интенсивность как процесса дробления, так и формирующихся волновых явлений.

Поскольку при короткозамедленном взрывании (КЗВ) заряд или группа зарядов ВВ взрываются с определенным промежутком времени, то создаются условия образования максимального количества свободных поверхностей для каждого последовательно разрушаемого участка.

Сложность процессов, происходящих в очаге взрыва, определяет сложный характер упругих колебаний, излучаемых в горный массив.

К настоящему времени механизм образования источников сейсмоколебаний при КЗВ полностью не раскрыт. Это объясняется, в частности, разнообразием процессов, происходящих при разрушении породы на каждой стадии взрыва, начиная от детонации заряда ВВ и заканчивая отрывом породы от массива.

Учитывая многостадийность формирования источников сейсмоколебаний при КЗВ, для прогнозирования эффекта взрыва необходимо выделить основной источник, определяющий волновую картину взрыва.

При многорядном КЗВ на горных предприятиях основным требованием к взрывным работам является обеспечение качественного дробления горной массы с одновременным достижением сейсмобезопасности объектов, окружающих предприятие. Эти требования могут быть удовлетворены при рациональном использовании энергии взрыва на полезную работу с учетом механизма разрушения горного массива. Расположенные во взрывном блоке

заряды, в зависимости от места их нахождения по отношению к откосу уступа, взрываясь, формируют дифференцированные очаги напряжения и зоны дробления. Так, например, механизм разрушения при взрыве скважинных зарядов ВВ, расположенных в первом ряду блока, отличается от характера разрушения взрывом скважин, расположенных в последующих рядах. Следует полагать, что и формирование источников сейсмоколебаний предопределяется механизмом, вызвавшим разрушение породы в очаге взрыва.

Для выяснения механизма образования источников сейсмоколебаний при КЗВ рассмотрим короткозамедленный взрыв двух зарядов ВВ, расположенных друг за другом на разных расстояниях от откоса уступа в блоке. В условиях отсутствия взрыва система находится в равновесии, то есть линии, характеризующие первый и второй заряд, не деформированы.

При взрыве первого заряда ВВ продукты детонации оказывают давление на стенки зарядной полости и создают фронт ударной волны. В результате в окружающем массиве породы вокруг заряда создаются напряжения сжатия. В направлении тыла массива, ввиду отсутствия условий для деформирования, будет образовываться зона сжатия породы и накопления деформации. В направлении же откоса уступа волна напряжений создает условия разупрочнения породы. Достигнув свободной поверхности, она отражается и, двигаясь в обратном направлении, создает отраженную растягивающую волну. На этой стадии процесса от первого заряда в массив излучается продольная волна сжатия. Линии, характеризующие первый заряд, асимметрично деформированы.

При взрыве второго заряда процесс развития напряжения и деформации проходит первую стадию как в предыдущем случае. При этом отраженная волна напряжения, возникшая от первого заряда, взаимодействует с волной сжатия от взрыва второго заряда и эти волны суммируются. Со стороны обнаженной поверхности (откоса уступа) образуются откольные трещины.

В тылу массива от последовательного взрывания зарядов происходит некоторое накопление деформации и увеличение зоны сжатия. В сторону же обнаженной поверхности происходит вспучивание откоса уступа. На этой стадии развития взрыва возникают упругие волны, характеризующиеся относительно малым периодом и длиной. Эти волны быстро затухают и образуют ближнюю сейсмическую зону.

На третьей стадии взрыва первого заряда в массиве происходит отрыв части породы со стороны уступа, а второй заряд, находясь на второй стадии развития процесса взрыва, создает напряжения, которые взаимодействуют с волнами напряжения первого заряда и создают условия высвобождения энергии, накопленной в массиве за первым зарядом. Суммарные напряжения сжатия, накопленные от действия взрыва двух зарядов в массиве за вторым зарядом, вызывают интенсивное образование трещин и излучение в массив волны с относительно большим периодом и длиной. Волны с такими параметрами слабо затухают и распространяются на значительные расстояния, образуя опасную сейсмическую зону для охраняемых объектов.

В случае взрыва второго заряда с замедлением, равным времени нахождения первого заряда на третьей стадии своего развития, происходит следующее. При взрыве второго заряда напряжения, создаваемые на фронте волны, достигнув границы зоны дробления, образованной процессом взрыва первого заряда, формируют отраженную волну. Последняя образует зону интенсивного разрушения со стороны первого заряда благодаря наличию деформаций, созданных взрывом первого заряда на третьей стадии развития процесса.

Таким образом, источник сейсмических колебаний от второго заряда будет нести минимум нагрузки, поскольку основная часть энергии волны напряжения теряется на полезную работу (разрушение породы). Следовательно, подбором интервала замедления между зарядами можно регулировать их сейсмическое и дробящее действие.

Как установлено в [1], зона сейсмического очага взрыва в анизотропных горных массивах имеет форму эллипса. Поэтому размеры большой и малой осей эллипса сейсмического очага единичного заряда определяются как

$$r_{\max} = C_{\max}^s T_0; \quad (1)$$

$$r_{\min} = C_{\min}^s T_0,$$

где r_{\max} , r_{\min} – радиусы очага по большой и малым осям эллипса соответственно, м; C_{\max} , C_{\min} – скорость распространения поперечных волн напряжения в направлении большой и малой осей эллиптического очага соответственно, м/с; T_0 – период колебаний на границах сейсмического очага взрыва, с.

Поскольку размеры сейсмического очага зависят от свойств пород, массы заряда и возбуждающего колебания той или иной частоты [2, 3], то можно записать

$$r_{\max} = K_{\max}^3 Q; \quad (2)$$

$$r_{\min} = K_{\min}^3 Q,$$

где K_{\max} , K_{\min} – линейные коэффициенты сейсмического очага в направлении большой и малой осей эллипса изосейсм соответственно, м/кг^{1/3},

$$K_{\max} = \frac{\sqrt[3]{C_{\max}^p} (1 - (C_{\max}^s / C_{\max}^p) 10^2)}{[\sqrt[3]{\rho C_{\max}^s} \sqrt[6]{1 - 4/3(C_{\max}^s / C_{\max}^p)}]}; \quad (3)$$

$$K_{\min} = \frac{\sqrt[3]{C_{\min}^p} (1 - C_{\min}^s / C_{\min}^p 10^2)}{[\sqrt[3]{\rho C_{\min}^s} \sqrt[6]{1 - 4/3(C_{\min}^s / C_{\min}^p)}]}; \quad (4)$$

где ρ – плотность пород, т/м³; C_{\max}^p, C_{\min}^p – скорость распространения продольной волны в направлении большой и малой осей эллипса сейсмического очага взрыва, м/с.

Проведенные исследования позволяют раскрыть взаимосвязь источника формирования сейсмоколебаний с механизмом разрушения породы в очаге взрыва при КЗВ. Однако при этом важным является фактор перераспределения энергии взрыва на различные формы работы [3]. В этой связи с целью создания метода снижения сейсмоопасности взрыва за счет перераспределения энергии взрыва на полезные формы его работы приведем нижеследующие рассуждения.

Образовавшиеся в результате взрыва газы с огромной силой ударяются о стенки зарядной полости и на контакте заряд–порода возникает ударная волна с параметрами, значительно превышающими прочность породы. Это приводит к ее раздавливанию и смятию.

Градиент интенсивности убывания ударной волны высокий, поэтому процесс разрушения породы на ее фронте вскоре прекращается. Ударная волна вырождается в волну напряжения. Энергия волнового поля напряжений в этой области еще достаточно велика и в результате взаимодействия волн сжатия и растяжения образуются трещины разрушения различных типов.

Дальнейшее удаление волны от эпицентра взрыва приводит к затуханию ее частоты и амплитуды, изменению формы и к трансформации волны напряжений в волну сейсмическую.

От источника возмущения (взрыва) в безграничном изотропном пространстве распространяется лишь два типа волн: продольные C_p и поперечные C_s , параметры которых увязаны со свойствами среды зависимостями

$$\begin{aligned} C_p &= \sqrt{\lambda + 2\mu/\rho}; \\ C_s &= \sqrt{\mu/\rho}, \end{aligned} \tag{5}$$

где ρ – плотность среды; λ, μ – константы Лямэ.

Легко установить из (5), что скорость продольной волны более чем в 1,5 раза выше скорости поперечной.

Продольная и поперечная волны являются объемными и главными, при их прохождении вблизи границ раздела пород с разными свойствами возникают волны различных типов – Релея, Лява, интерференционные, дифрагированные, спаренные и другие, не играющие существенной роли в дроблении горного массива.

Как известно, современное производство горных работ требует проведения промышленных взрывов больших объемов, что влечет за собой увеличение сейсмического воздействия на окружающую среду. Противоречие между потребностями производства в увеличении масштабов взрывов и одновременном снижении их сейсмозффекта в значительной мере устраняется применением способа КЗВ. Этот метод осуществления массовых взрывов

значительных объемов не только позволяет в принципе снижать сейсмические проявления, но при определенных схемах взрывания обеспечивает интенсификацию дробления массива пород. Считается [5, 6], что при промышленных взрывах полезно используется до 10...15 % потенциальной энергии заряда. Расчетным путем определено, что генерируемый взрывом волновой пакет обладает энергией 1...5 % всей потенциальной энергии заряда ВВ или от 20...30 до 50 % всего количества энергии, идущей на дробление.

Из приведенных величин понятна важность изыскания инженерных способов снижения доли сейсмической энергии в общем балансе взрыва и перераспределения ее на интенсификацию дробления.

Второй весьма перспективный путь уменьшения сейсмоопасности промышленного взрыва есть изыскание способов воздействия на формирование волнового спектра, имеющего минимальную энергетическую нагрузку на опасных частотах.

Обычно для зданий и сооружений опасной является длиннопериодная составляющая спектра сейсмоколебаний, что обусловлено их доминирующей низкой частотой (1–7 Гц). Разрушения в этом случае происходят в результате совпадения сейсмоколебаний с собственной частотой фундаментов объекта.

Для жестко скрепленных стальных конструкций или зданий и сооружений из сборного железобетона может представлять опасность и высокочастотный спектр сейсмоколебаний. Однако благодаря тому, что энергия высокочастотных колебаний с увеличением расстояния поглощается средой, высокочастотная составляющая спектра затухает вблизи сейсмоизлучателя и серьезной опасности не представляет.

Имеется несколько гипотез превращения потенциальной энергии заряда ВВ в работу по интенсивному дроблению. Некоторые исследователи считают, что снижение сейсмозффекта при КЗВ происходит вследствие разрушения фронта волн напряжений от зарядов последующих очередей на границе зон разрушенных взрывом зарядов предыдущих очередей взрывания. Происходит отражение, интерференция и суммирование волн, что приводит к интенсификации дробления. Другие гипотезы объясняют снижение сейсмоопасности при КЗВ интерференцией и суперпозицией волн в ближней зоне взрыва, изменением амплитуды сейсмоколебаний в результате их интерференции в дальней зоне. Наиболее простое, подкрепленное данными опыта, объяснение сводится к тому, что при КЗВ на охраняемые объекты воздействует энергия сейсмоволн лишь от одной группы одновременно детонировавших зарядов.

Энергетические предпосылки снижения сейсмозффекта вытекают из рассмотрения расхода общей потенциальной энергии заряда ВВ на различные виды совершаемой ею полезной и неполезной работы при взрыве.

Из закона сохранения энергии следует:

$$E = E_p + E_{II} + E_c, \quad (6)$$

где E – общая потенциальная энергия заряда; E_p – доля энергии, идущая на

полезные формы работы (разрушение породы); E_n – доля энергии, расходуемая на бесполезную работу при взрыве (нагрев породы, ее раздавливание, пластические деформации, разлет кусков, воздушную ударную волну, звуковую волну и др.); E_c – доля энергии, идущая на сейсмоизлучение.

Во всех попытках совершенствования взрывных работ инженерными способами подразумевается изыскание способа перераспределения энергии путем уменьшения E_n и E_c и увеличения E_p .

Каждому взрывнику-практику известно, что глухой взрыв с малым сейсмическим эффектом всегда сопровождается интенсивным дроблением породы. Потери энергии на звук, разброс, ударную воздушную и сейсмические волны уменьшены и эта часть использована на разрушение. Поэтому правомерно считать, что

$$E_p = f(E_n, E_c). \quad (7)$$

Разложив эту функцию в ряд Тейлора при некотором значении полезной энергии E_p и произведя ряд преобразований, получим аналитическое соотношение частей энергии, являющееся критерием применимости такой теоретической модели.

Относительную величину энергии разрушения E_p можно оценить по площади вновь образованной поверхности отбитой горной массы. Если V – общий объем отбитой взрывом породы, d – средний диаметр куска i -й фракции, то число N кусков этой фракции определится из соотношения

$$N_i \approx N_n / d_i^3, \quad (8)$$

где n – выход i -й фракции в %.

Для данной i -й суммарной площади вновь образованной поверхности фракции

$$S_i \approx V_i / d_i. \quad (9)$$

Перейдя к общему объему взорванной массы, найдем выражение пропорциональности вновь образованной суммарной поверхности этой фракции S :

$$S \approx Vn_i / d_i. \quad (10)$$

Считая, например, что полезной является лишь работа по образованию кусков диаметром d_1, d_2, d_3 мм, находим:

$$E_p = 0,01K(n_1 / d_1 + n_2 / d_2 + n_3 / d_3), \quad (11)$$

где K – коэффициент пропорциональности.

В целях проверки изложенного подхода к определению взаимосвязи E_p , E_n и E_c при неизменной общей энергии E (удельный расход ВВ сохранялся одинаковым во всех взрывах и равным $0,7 \text{ кг/м}^3$) и в одинаковом по свойствам массиве осуществлялось взрывание по различным схемам КЗВ с замерами

сейсмоколебаний и гранулометрического состава взорванной породы. Результаты эксперимента приведены в таблице.

**Взаимосвязь степени дробления массива взрывом
и скорости сейсмических волн**

№ взрыва	Содержание в объеме отбитой породы кусков с размером ребра			Скорость смещения, см/с
	$d_1 = 1,0$ м	$d_2 = 0,7$ м	$d_3 < 0,5$ м	
1	48,7	24,2	27,1	6,0
2	59,4	29,0	16,6	10,4
3	40,2	26,4	33,4	7,8
4	27,1	22,3	50,6	4,3
5	23,0	19,1	57,9	2,5
6	14,2	16,6	59,6	2,46

Изложенное убедительно доказывает, что решать проблему снижения сейсмичности промышленных взрывов следует в комплексе с задачами получения горной массы кондиционной крупности.

1. *Бойко В. В.* Метод побудови та управління межами сейсдобезпечних зон при підвирних роботах на кар'єрах України // Проблеми охорони праці в Україні – К.: ННДІОП. – 2001. – Вип. 4. – С. 17–24.

2. *Мосинец В. И., Богацкий В. Ф.* Основные научно-технические проблемы сейсмики ближней зоны // Взрывное дело. – М.: Недра, 1983. – 85/42. – С. 89–101.

3. *Богацкий В. Ф., Фридман А. Г.* Охрана инженерных сооружений и окружающей среды от вредного действия промышленных взрывов. – М.: Недра, 1982. – 242 с.

4. *Кучерявый Ф. И., Кучерявый Ю. Ф.* Управление сейсмическим действием массовых взрывов на карьерах. – Киев: Знание, 1978. – 20 с.

5. *Кучерявый Ю. Ф., Федорчук П. С.* Теоретическое исследование волнового поля при КЗВ // Механика и технология открытых горных работ. – Киев. – 1978. – С. 27–31.

6. *Кучерявый Ю. Ф.* Спектры сейсмоколебаний от промышленных взрывов и их трансформация в ближней зоне // Взрыв. дело. – М.: Недра. – 1983. – № 85/42. – С. 104–107.