

УДК 625.235.001.5 – 52

Е.И. Казакова, д-р техн. наук, проф.

Донецкий национальный технический университет

ул. Артема, 58, г. Донецк, 83000

info@dgtu.donetsk.ua

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЗРЫВОМ

Разработан экспресс-метод выбора схем короткозамедленного взрыва с учетом всех влияющих на этот процесс факторов. Доказано, что «дерево» участвующих в процессе поиска схем взрыва является марковским процессом.

В автоматизированной системе оперативного управления буровзрывными работами (БВР) на открытых горных разработках при выполнении технических и корректировочных расчетов на проведение массовых взрывов приходится решать вопрос о выборе схем короткозамедленного взрыва (КЗВ) скважинных зарядов во взрываемом блоке. Трудность решения этого вопроса в автоматизированном режиме объясняется сложностью формализации процесса выбора из большого числа разнообразных схем взрыва наилучшей для конкретных условий.

Учесть влияние всех факторов (как горногеологического, так и горно-технического характера) единым аналитическим выражением практически невозможно. Их совокупное влияние на выбор схем взрыва проявляется различно в разных условиях. Необходима оптимизация.

Существенное влияние на выбор рациональной схемы взрыва для конкретных горногеологических и горнотехнических условий оказывают следующие признаки, которые лежат в основе разработанной технологической классификации схем КЗВ на карьерах.

1. Степень трещиноватости (блочности) массива, которая определяет цель проведения БВР – получение горной массы заданной крупности. Так, чрезвычайно трещиноватые (мелкоблочные) и сильно трещиноватые (крупноблочные) породы необходимо только взрыхлять без дополнительного дробления с целью облегчения экскавации. Среднетрещиноватые (крупноблочные), малотрещиноватые (весьма крупноблочные) и практически монолитные (исключительно крупноблочные) породы необходимо подвергнуть дроблению и рыхлению. Если в первом случае рыхления массива можно достигнуть при безврубовых схемах взрыва, то во втором случае применять следует врубовые схемы взрыва, когда достигается лучшее дробление еще и за счет соударения оторванных кусков горных пород.

2. Допустимое количество одновременно взрываемого взрывчатого вещества (ВВ), которое накладывает ограничение на количество одновременно взрываемых зарядов. Это ограничение вызывается сейсмической без-

опасностью зданий и сооружений, расположенных в районе взрывных работ, устойчивостью бортов карьера.

Сравнивая оценки сейсмического эффекта при различных схемах КЗВ для постоянного заряда ВВ, число рядов и интервала замедления, можно показать, что при схемах взрывания по рядам через скважину, колебания снижаются в 2,3...2,5 раза; по волновой, клиновидной или трапецеидальной схеме взрывания – в 2,5...3,0 раза по сравнению со схемой взрывания по рядам.

Сейсмическое воздействие взрыва зависит и от направленности детонационной волны. Скорость колебания в тыл массива значительно больше, чем во фланги. Скорость колебания грунта по направлению детонации на 30...50% меньше, чем в тыл, а против направления детонации скорость колебания уменьшается в 2...5 раз. Максимальное снижение величины сейсмического эффекта достигается при фланговом развитии горных работ с приближением их к охраняемым объектам. Немаловажную роль в снижении сейсмического колебания играет такой технологический фактор, как число групп взрывааемых зарядов. Соблюдение этого ограничения приводит к переходу от порядных схем взрывания к схемам взрывания небольших групп зарядов и даже к поскважинным схемам КЗВ. Таким образом, величина сейсмического эффекта зависит не только от мощности источника генерирования колебаний и свойств среды, но и от ряда технологических факторов, главным из которых является оптимальная схема взрывания.

3. Акустическая жесткость массива определяет возможность применения волновых схем взрывания. Доля участия энергии упругих волн в общем процессе разрушения по мере увеличения акустической жесткости возрастает, а объем разрушений, обусловленный непосредственным воздействием расширяющихся газов, убывает. При большой акустической жесткости основным разрушающим фактором являются упругие волны напряжений, отраженные от открытых поверхностей. В породах со средней акустической жесткостью разрушающими факторами являются расширяющиеся газы и волны напряжений. При малой акустической жесткости разрушение происходит за счет запаса кинетической энергии, приобретенной средой при расширении продуктов взрыва. Малая акустическая жесткость горных пород не позволяет создать концентрацию волн напряжений и достигнуть хорошего дробления пород. В массиве пород с высокой акустической жесткостью волновые схемы взрывания позволяют достигнуть необходимого дробления пород.

4. Генеральное направление трещиноватости, так как оно определяет направление отбойки горной массы. Исследования, проведенные на карьерах Донбасса при производстве массовых взрывов, показали, что ориентировка фронта отбойки пород относительно основной системы трещин под

углом 45° позволяет снизить выход негабарита и уменьшить в 1,5 раза размер куска по сравнению с направлением отбойки под углом 0° и 90° относительно основной схемы трещин.

5. Ширина развала горной массы, которая ограничивается шириной площадок уступов, видом карьерного транспорта. Размеры развала горной массы должны создавать благоприятные условия для производительной работы экскаваторного и транспортного оборудования. Во многих случаях управление формой развала дает возможность избежать повреждения транспортных коммуникаций, линий электропередач, на уборку и восстановление которых затрачивается много средств и времени. Порядное взрывание скважинных зарядов, расположенных вдоль откоса уступа, дает развал горной массы большей ширины, так как ширина развала соответствует дальности отброса отбитой взрывам горной массы. Для уменьшения ширины развала применяют взрывание с торца уступа рядами, а лучше с центральным врубом или диагональное в сторону массива.

6. Угол падения напластований, так как он существенно влияет на фракционный состав горной массы и выход негабарита. При падении напластований в массив, касательные составляющие силы веса породных блоков прижимают их к массиву и создают более благоприятные условия их взрывного дробления. При падении напластований в сторону выработанного пространства касательные составляющие силы веса отдельных породных блоков направлены в выработанное пространство, что создает благоприятные условия для сползания в развал негабаритных блоков. Для достижения необходимой степени дробления необходим повышенный удельный расход ВВ, либо необходимо развернуть направление отбойки в плане таким образом, чтобы касательные составляющие силы веса блоков прижимали блоки к массиву и при этом создавались благополучные условия для достижения необходимой степени дробления.

7. Геометрические характеристики (параметры) взрываемого блока – длина, ширина, конфигурация его. В зарубежной практике ведения открытых горных работ имеется целый ряд примеров успешного применения в расчетах технологических параметров такого фактора, как форма взрываемого блока. Так, при производстве массовых взрывов, проводимых на таковитовом руднике Питер Митчелл в районе железорудного месторождения Месаби в США, при выборе схем взрывания в зависимости от формы взрываемого блока предпочтение отдается коммутации зарядов по схемам обратного клинового и трапецеидального врубов. Учет этих характеристик формы блока дает возможность выбрать рациональную схему взрывания, учитывая форму взрываемого блока. Если длина блока во много раз превышает ширину, то применяются схемы взрывания группами зарядов из нескольких рядов при перпендикулярном расположении относительно

длинной оси взрываемого блока, в противном случае – продольные схемы взрывания группами зарядов из нескольких рядов.

8. Количество рядов скважинных зарядов, которое накладывает ограничение на применение врубовых схем взрывания. Так, если количество рядов не более двух, то создание врубовых схем взрывания исключается; при трех и более возможно применение врубовых схем взрывания.

Таблица 1 – Ранжирование факторов

Эксперты	Факторы										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	9	10	5	7	6	1	2	4	3	8	11
2	10	9	7	6	2	3	1	4	5	8	11
3	10	11	6	4	3	2	1	7	5	9	8
4	9	11	7	6	4	1	2	5	3	8	10
5	9	10	7	6	5	4	3	2	1	8	11
6	11	9	7	4	6	2	1	5	3	10	8
7	9	11	7	3	6	5	4	1	2	8	10
8	11	9	7	6	4	1	2	5	3	8	10
9	11	10	6	7	4	3	2	1	5	9	8
10	11	10	1	7	3	4	2	5	6	8	9
11	10	9	4	5	3	2	1	7	6	8	11
12	11	10	8	7	4	1	2	5	3	6	9
13	11	9	7	6	4	2	3	1	5	8	10
14	10	9	6	7	3	2	1	5	4	8	11
15	9	8	7	6	5	2	1	4	3	11	10
16	9	8	7	6	4	1	2	3	5	10	11
17	10	11	7	5	3	1	2	6	4	8	9
18	11	9	5	3	4	1	2	7	6	8	10
19	9	10	7	6	4	2	3	1	5	8	11
20	10	11	7	1	6	2	3	4	5	8	9
21	10	9	6	7	5	2	1	3	4	8	11
22	9	10	7	6	3	1	2	5	4	8	11
23	8	11	6	7	1	2	3	5	4	9	10
24	10	11	6	7	3	1	2	4	5	8	9

Влияние каждого из этих факторов в различных условиях неодинаково, поэтому требуется количественно оценить степень влияния каждого из указанных факторов на результат взрыва. При отсутствии достоверной информации о степени их влияния необходимо воспользоваться опросом

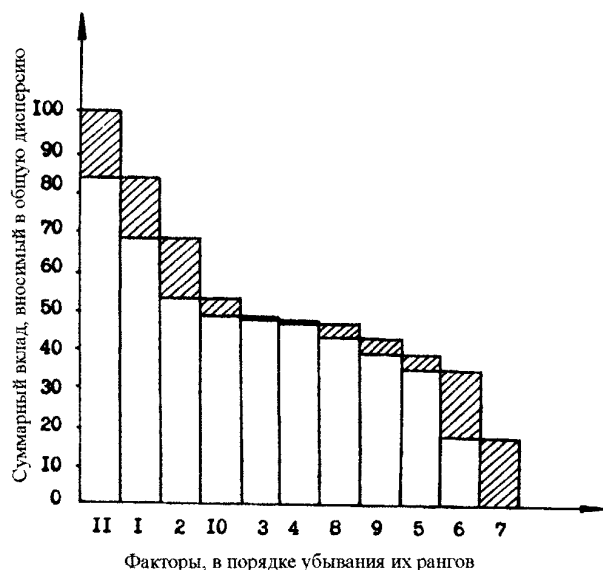


Рисунок 1 – Ранжирование факторов:

1 – сетка скважин; 2 – условия взрыва; 3 – акустическая жесткость; 4 – количество одновременно взрывающегося ВВ; 5 – удельная трещиноватость массива; 6 – угол падения напластований; 7 – генеральное направление трещиноватости; 8 – количество взрывающихся рядов; 9 – ширина развала взорванного массива; 10 – геометрические параметры (форма) взрывающегося блока; 11 – карьерный транспорт

компетентных работников производства, научно–исследовательских институтов и вузов известным в статистике приемом – экспертным опросом. Результаты математической обработки этого опроса приведены в таблице 1. Для уровня значимости 0,001 вычисленный коэффициент конкордации по Кендаллу составляет 0,85 при коэффициенте ранговой корреляции 0,84.

В программу исследования было включено восемь факторов, влияющих на выбор оптимальной схемы КЗВ, два фактора, связанных с условием проведения взрыва и один фактор – транспортирования. Факторы варьировались на двух и трех уровнях. Результаты коллективного ранжирования представлены в том порядке, в котором факторы расположены в порядке возрастания их рангов.

Методом статистического баланса была установлена количественная оценка степени влияния каждого фактора. Если по оси абсцисс отложить факторы в порядке убывания их рангов, а по оси ординат – суммарный вклад, вносимый в общую дисперсию данным фактором и всеми менее значимыми факторами, то получим затухание экспоненциального типа (рисунок 1).

Таким образом, основные факторы, наиболее существенно влияющие на выбор схемы КЗВ по методу статистического баланса и по весьма согласованному мнению экспертов представлены в строгой иерархической последовательности, причем доля вклада, вносимая каждым значимым фактором в общую дисперсию поиска такова: генеральное направление трещиноватости (17,04), угол падения напластований (34,08), удельная трещиноватость массива (38,69), ширина развала взорванного массива (42,43), количество взрываемых рядов (46,17), максимальное количество одновременно взрываемого ВВ (46,32), акустическая жесткость (46,68), форма блока (52,46).

Алгоритм построения схем КЗВ может быть сформулирован следующим образом.

На основании результатов экспертного опроса выявлено, что первый уровень иерархии «дерева» принадлежит двум факторам с одинаковой суммой рангов – генеральному направлению трещиноватости и углу падения напластований. Приоритет выполнения первого шага поиска рациональной схемы взрывания принадлежит генеральному направлению трещиноватости. Угол падения напластований в «дереве» играет подчиненную роль, так как мощность разрабатываемого пласта может значительно превышать высоту разрабатываемого уступа, тогда как анализ угла падения напластований не дает конкретного представления о направлении поиска выбора схем взрывания. В связи с тем, что отбойка породы ведется под углом 45° , на первом шаге поиска получаем продольные и поперечные схемы КЗВ при азимуте простирания основной системы трещин в диапазоне $22,5^\circ \dots 67,5^\circ$, а диагональные схемы взрывания для крутых ($0^\circ \dots 22,5^\circ$) и слабонаклонных ($67,5^\circ \dots 90^\circ$) систем трещин. Таким образом, происходит первое разветвление «дерева» поиска оптимальной схемы взрывания и далее анализ ведется для вновь появляемой ветви.

При горизонтальном или пологом напластовании, кроме отдельных случаев особых горногеологических условий, применимы все схемы КЗВ. При падении напластований в выработанное пространство применимы поперечные схемы КЗВ, а при падении напластований в массив – продольные схемы взрывания.

Второй уровень иерархии «дерева» поиска схем взрывания включает в себя удельную трещиноватость массива, ширину развала и количество взрываемых рядов, целесообразность включения которых в поиск основано на классификации схем КЗВ и результатах экспертного опроса.

Для дальнейшего поиска схем взрывания объединим I, II категории и III, IV, V категории классификации пород по степени трещиноватости. При этом получим удобные, достаточно полные для практического использования ветви «дерева» – очень трещиноватые (мелкоблочные), удельная

трещиноватость 2...10, более 10 и слабо трещиноватые (крупноблочные), удельная трещиноватость 1...2, 1...0,65, менее 0,65.

Выбор той или иной схемы взрывания зависит не только от степени трещиноватости породы, напластования, ориентировки систем трещин и т.д., но и от требований, предъявляемых к взрыву, особенно к ширине развала породы. Необходимость ее ограничения возникает при транспортной технологии. При условии бестранспортной технологии разработки ширина развала горной массы должна быть компактной.

И, наконец, последний фактор данного уровня иерархии – количество взрывааемых рядов. Рассматриваются два случая: количество взрывааемых рядов меньше или равно трем и количество взрывааемых рядов больше трех.

Следующий уровень иерархии «дерева» объединяет такие факторы, как максимально допустимое количество одновременно взрывааемого ВВ, характеризующее сейсмичность выбранной схемы взрывания и акустическую жесткость массива, которая определяет целесообразность применения волновых схем взрывания, обусловленных пониженной сейсмичностью. В «дереве» анализируется малая, средняя и большая акустическая жесткость.

Заключительный уровень иерархии в «дереве» схем взрывания характеризуется геометрическими параметрами массива, подлежащего взрывному разрушению. Учет конфигурации взрывааемого блока указывает на конкретную схему взрывания.

Функционирование процесса выбора схем КЗВ представляет собой последовательную схему его состояний. Как указывалось, на выбор той или иной схемы взрывания воздействует большое число возмущений. Источником таких возмущений, с одной стороны, является взрываема среда, с другой – технологические и организационные факторы.

Покажем, что разветвленное «дерево» участвующих в процессе поиска схем взрывания является марковским процессом. В начальный момент времени n_o имеется конечная совокупность $N(n_o)$ схем КЗВ, причем каждая схема взрывания относится к одному из m ($m < \infty$) типов. Количество схем каждого типа j в момент n равно $C_j(n_o)$, так что

$$\sum_{j=1}^m C_j(n_o) = N(n_o).$$

Каждая схема взрывания может по истечении некоторого промежутка времени Δn_{jk} (k – порядковый номер в классификации схем взрывания, причем $1 \leq k \leq C_j$) вступать в один из l_j иерархических уровней (одинаковых для схем одного и того же типа), которые обозначим

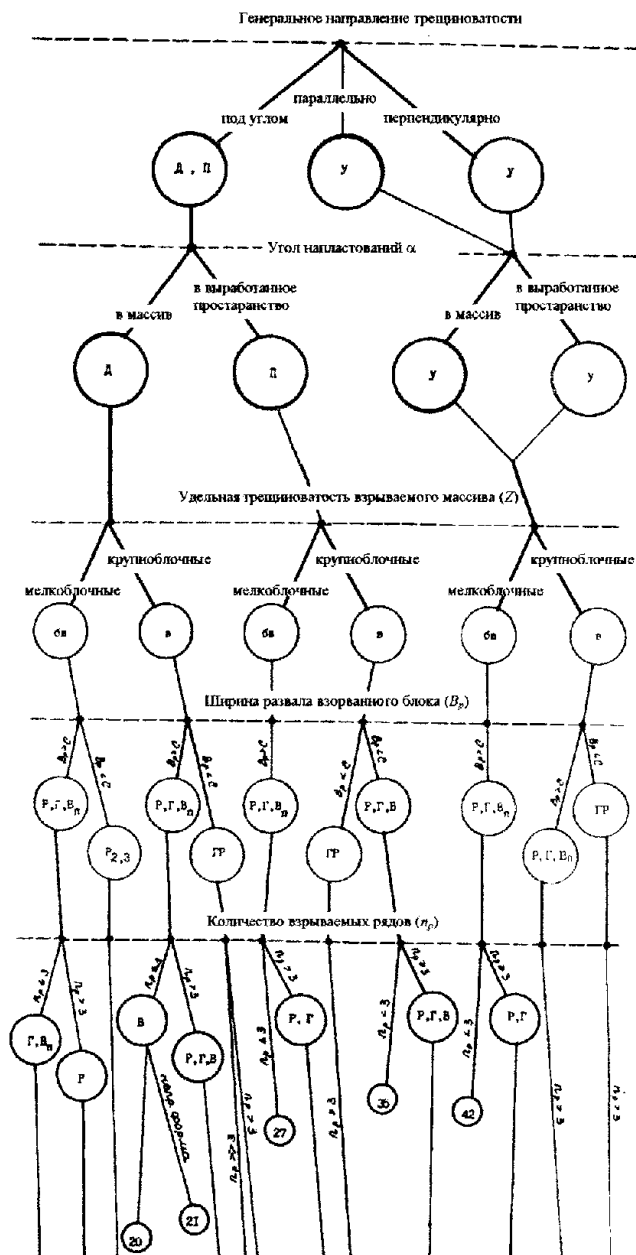


Рисунок 2 – «Дерево» выбора схем КЗВ на карьерах
(Начало. Продолжение см. ниже)

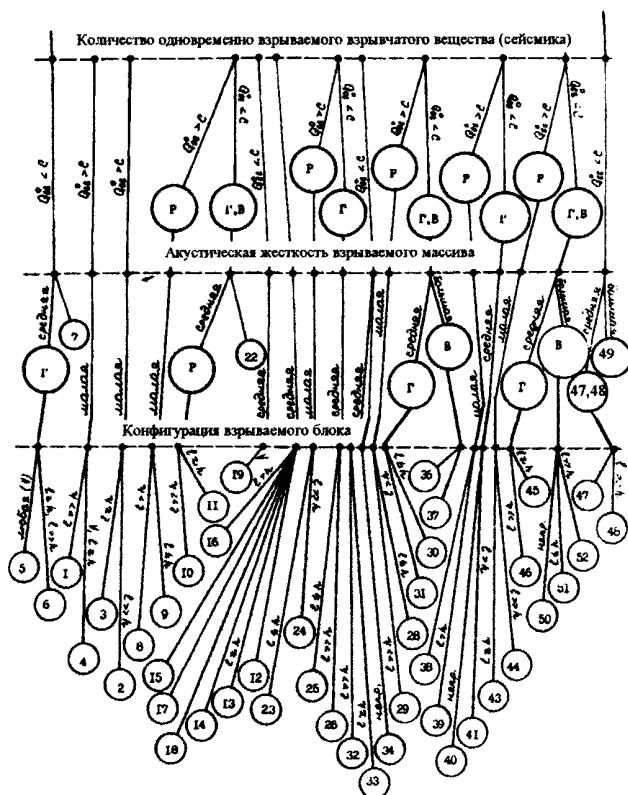


Рисунок 2 – «Дерево» выбора схем КЗВ на карьерах
(Продолжение. Начало см. выше)

$\Pi_{ji} (1 \leq j \leq m, 1 \leq i \leq l_j)$, причем поведение схемы происходит независимо от поведения остальных схем взрывания. Каждая схема взрывания обладает некоторым свойством, назовем его характеристикой и обозначим M_{jk} .

Заметим также, что промежуток времени Δn_{jk} не зависит от n_o и является случайной величиной, функция распределения которой зависит от параметра – характеристики схем взрывания в момент начала поиска выбора схем КЗВ. Причем поиск схем взрывания происходит независимо от поведения направления остальных путей поиска.

Вид иерархического уровня Π_{ji} , в который вступает по истечении интервала времени Δn_{jk} каждая из схем взрывания S_{jk} , не зависит от момен-

та совершения и является случайным в том смысле, что сам иерархический уровень происходит случайно с вероятностью $P_{ji} \left(\sum P_{ji} = 1, i = 1, \dots, l_j \right)$.

В результате анализа иерархических уровней Π_{ji} из одного участвующего в иерархическом уровне класса схем взрывания S_{jk} , образуется d_{ji} новых схем взрывания, из которых d_{jis} относится к типу s :

$$\sum_{s=1}^m d_{jis} = d_{ij}.$$

Сумма характеристик всех вновь образованных при анализе иерархических уровней схем взрывания равна характеристике первоначального класса схем взрывания. Характеристики–компоненты вновь образованных схем взрывания являются случайными величинами. При этом в плотность распределения характеристики первой вновь образованной схемы (схема номер 1) параметром входит характеристика схемы S_{jk} , а в плотность распределения характеристик схемы с номером $(1 \leq q \leq d_{ji})$ параметрами входят характеристика схемы S_{jk} и характеристика $q-1$ предшествовавших схем, все параметры которых уже определены. Иначе, характеристики вновь образованных схем КЗВ являются зависимыми случайными величинами.

Образовавшиеся новые типы схем взрывания по истечении случайных промежутков времени вновь участвуют в анализе иерархических уровней, образуя все новые и новые схемы различных типов. Фиксируя определенный конечный момент времени $n_{\text{кон}}$, после которого наблюдение над всеми схемами прекращается, получаем разветвленное «дерево» выбора схем взрывания. Процесс поиска схем КЗВ является марковским процессом. Вероятностью перехода его служат вероятности P_{ji} , а состояниями – иерархические уровни Π_{ji} .

Для моделирования ветвящегося «дерева» на ЭВМ использовался лексикографический метод обхода. Прослеживание производится по определенной траектории, пока стохастический процесс не прервется. При этом «прослеживание» схемы от первой до последней фиксируются и запоминаются в памяти ЭВМ.

Полученные результаты будут использованы для дальнейших исследований по совершенствованию оперативного управления буровзрывными работами.

Поступила в редакцию 19.12.2002 г.