Дисциплина «Актуальные проблемы в горном деле»
для магистрантов ОП 7М07203 "Горное дело"

Лекция 7. Современные методы и технологии буровзрывных работ (БВР)

Цель лекции: Сформировать у магистрантов комплексное представление о современных подходах к контролю качества буровзрывных работ, включая проблемы перебора и недобора сечения горных выработок и их влияние на устойчивость приконтурного массива. Ознакомить с критериями оценки качества БВР, в частности коэффициентом излишка сечения (КИС) и фактором нарушенности массива D в критерии Хука-Брауна. Изучить технологии контурного и предконтурного взрывания, позволяющие минимизировать повреждения законтурного массива. Освоить методы оптимизации паспортов БВР на основе геологического индекса прочности (GSI) для повышения точности и безопасности горных работ.

План лекции:

1) Проблема перебора и недобора сечения выработок. Влияние БВР на устойчивость приконтурного массива.

2) Фактор нарушенности (D) и коэффициент излишка сечения (КИС).

3) Контурное и предконтурное взрывание. Оптимизация паспортов БВР с учётом GSI.

Введение

Буровзрывные работы являются одним из наиболее сложных и ответственных технологических процессов в горном деле. От их качества напрямую зависят безопасность ведения работ, устойчивость капитальных горных выработок, экономическая эффективность последующих этапов (погрузка, транспортировка, обогащение) и общая себестоимость добычи.

Основная проблема, с которой сталкиваются специалисты, это нестабильность гранулометрического состава взорванной породы и отклонение фактического контура выработки от проектного. Неверный расчёт параметров БВР, ошибочный подбор типа ВВ, неточности при формировании сетки шпуров приводят не только к экономическим потерям, но и к обрушению горных массивов, уступов, снижению несущей способности крепи.

Современный подход к БВР требует системного взгляда: необходимо дробить породу так, чтобы стабильно получать куски определённых размеров, а форма выработки максимально соответствовала проектной. Для этого требуется внедрение технологий щадящего взрывания, использование методов контурного и предконтурного взрывания, а также переход от эмпирических методов

проектирования к расчётным, основанным на геомеханической классификации массива (GSI, фактор D).

1. Проблема перебора и недобора сечения выработок. Влияние БВР на устойчивость приконтурного массива

При проведении горных выработок буровзрывным способом основными показателями качества являются точность оконтуривания и степень сохранности окружающего массива.

Перебор сечения – это превышение фактической площади поперечного сечения выработки над проектной. Шахтными инструментальными замерами установлено, что фактические величины допустимых отклонений геометрических размеров от проектных в реальных условиях значительно превышают нормативные. Последствия перебора:

- Увеличение объёмов работ по забутовке закрепного пространства, которые выполняются вручную и часто в незакрепленной части выработки;
- Неравномерное распределение нагрузки на рамную крепь из-за пустот закрепного пространства, что снижает её несущую способность и может привести к деформациям и завалам;
- Повышенный расход крепёжных материалов и бетона для заполнения переборов;
- Дополнительный объём породы на транспортировку и переработку.

Недобор сечения представляет собой ситуацию, когда фактическое сечение выработки меньше проектного. Это вынуждает производить дополнительную доработку контура, часто с применением ручного инструмента, что крайне опасно и нетехнологично. Недобор может привести к невозможности размещения проектного оборудования, нарушениям правил безопасности по зазорам.

Нарушенность массива в приконтурной зоне в результате воздействия взрыва - одна из ключевых проблем современной геомеханики. Динамическое действие взрыва вызывает:

- Развитие системы трещин вокруг выработки, распространяющихся вглубь массива на расстояние от 0,5 до 3 м и более. При очень плохом качестве взрыва зона повреждений может достигать 2-3 м;
- Снижение прочностных свойств пород в зоне влияния: модуль деформации, сцепление и угол внутреннего трения могут снижаться на 30-60% по сравнению с ненарушенным массивом;
- Активизацию тектонических нарушений: обводненность массива способствует распространению взрывных волн на большее расстояние и негативно влияет на сохранение устойчивости откосов уступов;
- Сейсмическое воздействие: многократные взрывы при постановке уступов в предельное положение создают кумулятивный эффект повреждения.

Исследования, проведённые Институтом горного дела УрО РАН на карьере Джетыгаринского месторождения, были направлены на разработку параметров отработки приконтурных блоков, обеспечивающих снижение динамической нагрузки от взрывных работ на законтурный массив.

2. Фактор нарушенности (D) и коэффициент излишка сечения (КИС)

Коэффициент излишка сечения (КИС) – это основной нормируемый показатель точности оконтуривания горной выработки.

Формула:

$$\xi = S_{\text{ф}}/S_{\text{в}}\text{ч}$$

где: $S_{\text{ф}}$ - фактическая площадь поперечного сечения выработки в проходке, м²

$S_{\text{в}}$ч - проектная площадь поперечного сечения выработки вчерне, м²

При правильном определении параметров БВР КИС должен составлять 1,03-1,05. На практике при традиционных методах взрывания КИС достигает 1,15-1,20. Допустимые отклонения регламентируются государственными сметными нормами.

КИС является критерием соблюдения одного из главных требований к буровзрывным работам: фактические форма и размеры выработки должны быть близки к проектным. В паспорте БВР наряду с КИС рассчитывают также коэффициент использования шпуров (КИШ), который обычно составляет 0,80-0,95.

Фактор нарушенности D в критерии Хука-Брауна

Фактор нарушенности (D) – это безразмерный параметр в модифицированном критерии прочности Хука-Брауна, который количественно описывает степень воздействия взрывных работ на массив горных пород.

Фактор D был введён Хуком и Брауном для учёта критического влияния зоны повреждения, вызванного взрывом, при оценке параметров горного массива. Фактор нарушенности описывает амплитуду нарушения массива, которая, в свою очередь, влияет на другие материальные параметры в конститутивной модели Хука-Брауна.

Шкала значений фактора D по рекомендациям Хука (1998):

Описание массива и условий ведения работ	Значение D
Применение передовых методов управляемого взрывания или проходка ТБМ	D = 0
Механическая или ручная выемка в породах низкого качества (без взрыва)	D = 0
Небольшое взрывание при проходке скальных откосов, приводящее к умеренному повреждению	D = 0,7

Описание массива и условий ведения работ	Значение D
Очень плохое качество взрыва с серьёзным локальным повреждением, распространяющимся на 2–3 м в породах кровли	D = 0,8
Крупномасштабное взрывание на больших открытых откосах с серьёзным нарушением из-за снятия напряжений	D = 1

Фактор D напрямую взаимосвязан с GSI (геологическим индексом прочности). При увеличении степени повреждения породы Ds фактор D растёт экспоненциально. В многостадийном взрывании кумулятивное повреждение массива достигает максимума именно в зоне накопленных повреждений, особенно на вершине каждого уступа. Геологический индекс прочности GSI играет значительную роль в сопротивлении породы действию взрыва .

Взаимосвязь КИС, D и устойчивости выработки

Между КИС, фактором D и долгосрочной устойчивостью выработки существует прямая корреляция:

- Высокий КИС (значительный перебор) обычно свидетельствует о неоптимальных параметрах БВР – повышенном удельном расходе ВВ, завышенном диаметре контурных шпуров, недостаточно точном бурении – что автоматически ведёт к высокому значению фактора D (0,7-1,0).

- Низкий КИС (близкий к 1,0) характерен для качественного контурного взрывания и соответствует невысокому фактору D (0-0,5).

- Для обеспечения устойчивости капитальных выработок с длительным сроком службы необходимо стремиться к КИС не более 1,05 и фактору D не выше 0,4-0,5.

3. Контурное и предконтурное взрывание. Оптимизация паспортов БВР с учётом GSI

Контурное взрывание – это способ производства взрывных работ, при котором достигается максимальное приближение фактического профиля выработок и выемок к проектному при сохранности сплошности массива горных пород .

Принципиальные особенности контурного взрывания:

- Малый коэффициент сближения шпуров: отношение расстояния между оконтуривающими шпурами к линии наименьшего сопротивления уменьшается в 1,5-2 раза по сравнению с обычным взрыванием;

- Сниженная масса заряда: масса заряда ВВ в оконтуривающих шпурах в 2,5-4 раза меньше обычной;

- Декаплинговый заряд: используется заряд малого диаметра с кольцевым воздушным зазором, который снижает пиковое давление на стенки скважины;

- Специальная схема инициирования: контурные шпуры взрываются с замедлением не менее 25 мс после врубовых и вспомогательных.

Две разновидности контурного взрывания:

Тип	Технология	Область применения
Предварительное	Вначале взрывают заряды в оконтуривающих шпурах, создавая щель по периметру, затем – остальные	Большие сечения выработок, широкие выемки, особо ответственные объекты
Последующее	Контурные заряды взрываются после врубовых и отбойных с замедлением	Стандартные горные выработки, тоннели

За счёт создания щели по периметру выработки (при предварительном контурном взрывании) последующая отработка оконтуренного объёма не нарушает сплошность окружающего массива. Международные исследования показывают, что при проходке тоннелей на глубоких горизонтах smooth blasting (гладкое взрывание) демонстрирует лучшие результаты, чем предварительное расклинивание (presplitting), поскольку при гладком взрывании больше энергии взрыва расходуется на дробление породы в зоне выработки и достигается лучший контроль за трещинообразованием .

Предконтурное взрывание (Pre-splitting)

Предконтурное взрывание (pre-splitting) – это технология, при которой до массового взрыва по контуру будущей выработки (борта карьера) создаётся искусственная трещина, разделяющая отбиваемую и законтурную части массива.

Ключевые параметры предконтурного взрывания:

- Шпуры (скважины) бурятся по контуру с шагом примерно 10-12 диаметров заряда
- Используются небольшие рассредоточенные заряды малой мощности (обычно декаплинговые)
- Отношение диаметра скважины к диаметру заряда (коэффициент декаплинга) изменяется от 2 до 3
- Инициирование зарядов предконтура производится одновременно или с небольшим опережением основного взрыва (90-120 мс) для создания сплошного раскола.

Функции созданной трещины:

- Экранирование: щель прерывает распространение сейсмических волн от основного взрыва в законтурный массив;
- Разгрузка давлений: трещина служит для выпуска газов, образующихся при взрыве8
- Чёткое отделение: позволяет получить ровную стенку уступа без нависаний и локальных переборов.

По современным данным, для подземных выработок приоритетно рекомендовано гладкое взрывание (smooth blasting), особенно в условиях

высокого начального поля напряжений. Для открытых горных работ и крутых уступов предконтурное взрывание остаётся наиболее распространённым способом защиты законтурного массива.

Оптимизация паспортов БВР с учётом GSI

Геологический индекс прочности (GSI) – система классификации горного массива, разработанная в инженерной геомеханике для получения надёжных входных данных при проектировании тоннелей, откосов и фундаментов . GSI основан на визуальной оценке двух характеристик массива: структурной целостности (блочности) и качества поверхности трещин.

Значение GSI для оптимизации БВР:

1. Оценка взрываемости пород: GSI напрямую связан с удельным расходом ВВ, необходимым для эффективного дробления. Массивы с высоким GSI (> 60) требуют больших удельных расходов, но позволяют применять более широкую сетку скважин. Низкие значения GSI (< 30) требуют деликатного подхода и снижения зарядов во избежание завалов.
2. Выбор схемы контурного взрывания:

- GSI > 60 (блочный массив хорошего качества): возможно применение стандартного контурного взрывания с обычными зарядами;
- GSI 30-60 (нарушенный, трещиноватый массив): требуется уменьшение расстояния между контурными шпурами на 20-30%;
- GSI < 30 (очень слабый, раздробленный массив): применение специальных методов управляемого взрывания, возможно снижение диаметра шпуров и минимизация зарядов.

3. Прогнозирование сейсмического эффекта: GSI массива, через который распространяется сейсмическая волна, является ключевым параметром при модификации закона затухания колебаний. Включение GSI в формулу USBM (United States Bureau of Mines) повышает точность прогноза на 20% . Коэффициент детерминации R^2 при этом возрастает с 0,77 до 0,89 .
4. Расчёт параметров паспорта БВР: с использованием GSI и фактора D могут быть рассчитаны параметры Хука-Брауна (mb, s, a), которые затем используются в численном моделировании напряжённо-деформированного состояния массива .

Практический кейс: на руднике «La Maruja» в Колумбии на основе GSI построена геомеханическая таблица для выбора конфигурации буровой сетки применительно к каждому типу породы. Конфигурация сетки варьировалась от 60×60 до 80×80 см. Гарантированный максимальный размер куска после взрыва составил 30 см, а затраты снизились на 24,6% .

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое коэффициент излишка сечения (КИС) и каковы его нормативные значения?Какие негативные последствия возникают при значительном превышении КИС?

2. Что характеризует фактор нарушенности D в критерии Хука-Брауна? Приведите примеры значений D для различных условий ведения БВР и объясните, как фактор D влияет на прочностные свойства массива.

3. В чём принципиальное различие между предварительным и последующим контурным взрыванием? Какие технологические приёмы (коэффициент сближения шпуров, масса заряда, инициирование) позволяют минимизировать повреждение законтурного массива?

4. Какие преимущества имеет гладкое взрывание (smooth blasting) по сравнению с предконтурным взрыванием (pre-splitting) при проведении подземных тоннелей? В каком случае предконтурное взрывание остаётся предпочтительным методом?

5. Как значение геологического индекса прочности GSI может быть использовано для оптимизации параметров паспорта БВР? Приведите пример практического применения GSI при выборе сетки буровых шпуров.

Список использованной литературы

1. Дёмшина Н. Буровзрывные работы в «едином окне» - повышение эффективности ведения взрывных работ // Внедра. 2026.

2. Хакулов В.А. Анализ негативных последствий переборов при проходке горных выработок // Донецкий национальный технический университет, 2012.

3. Жариков С.Н., Кутуев В.А. Результаты экспериментальных исследований динамического действия взрыва на предельном контуре карьера // Институт горного дела УрО РАН. - 2021.

4. Рахманов Р.А., Аленичев И.А., Лушников В.Н. Технологии щадящего взрывания, опыт и перспективы внедрения на предприятиях компании «Полюс» // Горный журнал. 2021. № 1.

5. Хоек Э., Браун Э.Т. Критерий разрушения Хука-Брауна // Горная энциклопедия. 1980.

6. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition // Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium. Toronto, 2002. P. 267–273.

7. Marinos V., Hoek E. The geological strength index: applications and limitations // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2005. Vol. 64. P. 55-65.

8. Singh R.K., et al. Review of the Geological Strength Index (GSI) as an Empirical Classification and Rock Mass Property Estimation Tool: Origination, Modifications, Applications, and Limitations // DOAJ. 2020.

9. Qian X., et al. Stability analysis of multi-stage blasting rock slopes based on the Hoek-Brown criterion considering cumulative disturbance // Engineering Geology. 2025. Vol. 352.

10. Hu Y., Lu W., Chen M., Yan P., Yang J. Comparison of Blast-Induced Damage Between Presplit and Smooth Blasting of High Rock Slope // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2014. Vol. 47. P. 1307-1320.