

А.В. Солодянкин, А.Е. Янкин

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОКОНТУРИВАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ ПРИ ПРОХОДКЕ БУРОВЗРЫВНЫМ СПОСОБОМ

Предложена новая схема отбойки пород при проходке стволов. Особенностью схемы является уступная форма забоя с отставанием оконтуривающих шпуров от основного комплекта. Обоснована численная модель для изучения напряженно-деформированного состояния призабойной части ствола. Выполнены численные исследования по определению эффективной высоты уступа, при котором разрушения контура ствола в нижней части заходки не происходит. Установлена зависимость коэффициента устойчивости приконтурного массива пород от высоты уступа.

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОКОНТУРЮВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ СТВОЛІВ ПРИ ПРОХОДЦІ БУРОПІДРИВНИМ СПОСОБОМ

Запропоновано нову схему відбійки порід при проходці стволів. Особливістю схеми є уступна форма вибою з відставанням контурних шпурів від основного комплекта. Обґрунтована чисельна модель для вивчення напружено-деформованого стану привибійної частини ствола. Виконані чисельні дослідження з визначення ефективної висоти уступу, при якому руйнування контуру ствола в нижній частині західки не відбувається. Встановлена залежність коефіцієнта стійкості приконтурного масиву порід від висоти уступу в вибої ствола.

QUALITY IMPROVEMENT OF VERTICAL SHAFTS OUTLINING AT BLAST-HOLE DRILLING

A new scheme of breaking rocks during shafts is proposed. Feature of the scheme is benching shape contouring the face with a lag from the main holes of the round. Numerical model for the study of stress-deformed state of the barrel bottom hole is substantiated. Numerical study to determine the effective height of the ledge, where the destruction of the circuit at the bottom of the barrel stope happens is executed. The dependence of the coefficient of the marginal stability of rock mass on the height of the ledge at the bottom of the barrel is established.

ВВЕДЕНИЕ

Буровзрывной способ в настоящее время остается основным при выемке горных пород. В Донбассе все вертикальные стволы проходят с применением буровзрывной технологии. Удельный вес буровзрывных

работ (БВР) в общем объеме проходческого цикла составляет до 40 – 50% [1]. Основными параметрами буровзрывных работ при проходке вертикальных стволов являются: удельный расход ВВ, количество, глубина и расположение шпуров.

Контур породных стенок при буровзрывной проходке имеет сложный рельеф

в виде случайно расположенных неровностей – выступов и впадин. При этом характерными являются переборы породы, т.е. излишнее разрушение приконтурных пород, превышающие проектные размеры ствола. По данным [2], средневзвешенные линейные переборы для стволов с бетонной крепью составляют 100 – 300 мм, максимальные 400 – 450 мм. Объем переборов породы на 1 м ствола в основном колеблется от 2 до 4,4 м³ (7 – 17,1%), иногда достигая 6 м³ (27,3%), в 1,5 – 2 раза превышая допустимые значения. Это увеличивает затраты труда и времени на уборку породы и вызывает перерасход бетона, увеличивая его в 1,5 – 2 раза, по сравнению с проектным объемом.

Неровности породного контура ствола, помимо этого, ухудшают условия работы крепи. Так при использовании в качестве крепи тубингов неровности стенок становятся причиной неравномерных давлений на крепь, появления опасных сосредоточенных нагрузок, приводящих к деформациям и разрушению крепи. При значительных неровностях и нарушениях сплошности породного контура провоцируется развитие разрушений в глубь массива, вызывая вывалы, что обуславливает проведение весьма трудоемких и дорогих работ по ремонту выработки.

Все сказанное говорит об актуальности исследования вопросов более гладкого оконтуривания боковых стен столов при выполнении БВР и разработке эффективных мероприятий, позволяющих снизить величину неровностей и степень нарушения приконтурного массива пород.

Целью настоящей статьи является обоснование параметров способа взрывной отбойки при проходке вертикальных стволов, снижающей величину разрушений и переборов в боковых стенах ствола.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Неравномерность разрушения боковых стен ствола по глубине заходки может

быть объяснена различными условиями разрушения породы по длине оконтуривающего шпура. В [3] приведена принципиальная схема характера разрушения пород буровзрывным способом при проведении горизонтальных выработок (рис. 1).

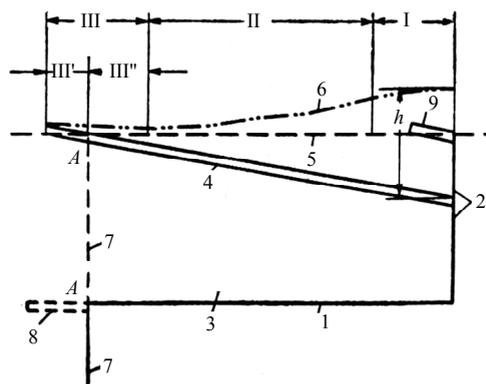


Рис. 1. Принципиальная схема различных зон разрушения по длине оконтуривающего шпура: I, II, III – зоны разрушения; 1, 2 – плоскости обнажения; 3 – слой породы, отбиваемый оконтуривающими шпурами; 4 – оконтуривающий шпур; 5 – проектный контур выработки; 6 – фактический контур выработки; 7 – грудь забоя последующей заходки; 8, 9 – стаканы соответственно отбойного и оконтуривающего шпуров

Участок I у устья шпура разрушается практически при двух поверхностях обнажения 1 и 2. Причем находится в зоне, уже подвергавшейся действию взрыва донной части шпуров предыдущей заходки.

Обычно расстояние от устья оконтуривающего шпура до проектного контура выработки колеблется от 20 до 60 см. Глубина стаканов 9 оконтуривающих шпуров равна, как правило, 20 – 40 см, иногда более. Вследствие этого взрыв разрушает породу не только по линии оконтуривающих шпуров в сторону забоя, но и за обуренным контуром, т.е. в сторону массива. Разрушение распространяется на некоторую глубину h , которая приблизительно равна расстоянию между донной частью оконтуривающих шпуров предыдущей заходки и устьем оконтуривающих шпуров в новой

заходке, а иногда несколько превышает указанное расстояние.

По мере удаления от устья ко дну оконтуривающих шпуров влияние второй поверхности обнажения 2 на разрушение породы уменьшается. С достаточной степенью точности можно полагать, что в средней части шпурового заряда II разрушение происходит уже при одной обнаженной поверхности, причем в участке, практически не подвергавшемся действию взрыва донной части оконтуривающих шпуров предыдущей заходки. Естественно, что перебор породы здесь заметно уменьшается.

На участке III у донной части оконтуривающего шпура разрушение породы происходит в особых условиях. Та часть заряда III', которая расположена непосредственно в донной части шпура, остающейся затем в виде стакана, взрывается практически при отсутствии поверхности обнажения. Результатом взрыва этой части заряда является некоторое нарушение сплошности окружающего массива. Обычно дно оконтуривающих шпуров выводят за проектный контур выработки на 20–30 см, а иногда и более. Действие взрыва части заряда III'', непосредственно прилегающей к груди забоя, направлено на отрыв породы по линии оконтуривающих шпуров (с небольшим перебором) и на срез по линии A – A.

Проведение буровзрывных работ в вертикальных выработках имеет свою специфику. В отличие от горизонтальных выработок, в настоящее время для стволов характерна глубина заходки около 4 м при глубине шпуров 4,2–4,4 м. Шпуровой заряд при использовании патронов диаметром 45 мм занимает примерно половину длины шпура.

В связи с этим для определения степени соответствия схемы разрушения боковых пород по глубине шпура для горизонтальных и вертикальных выработок в забое воздухоподающего ствола №2 на АП «Шахта им. А.Ф. Засядько» был проведен комплекс визуальных обследований состояния породных обнажений после выполнения БВР.

Выполненные обследования показали, что основной причиной переборов породы при проходке является существующая технология ведения буровзрывных работ. Значительная концентрация избыточной энергии ВВ в оконтуривающих шпурах вследствие применения в них зарядов увеличенного диаметра и плотного заряжения вызывает дополнительные переборы и разрушение обнажений в стволах до закрепления их монолитным бетоном. Между тем, при проходке стволов существует практика увеличения зарядов именно в нижней части шпура (за счет более мощных патронов ВВ, применения обратного инициирования и др.) с целью увеличения КИШ, лучшего дробления породы, усиленного рыхления нижней части взрываемого массива для повышения производительности и полноты механизированной погрузки.

Следует отметить также, что на сформированном контуре выработок, пройденных буровзрывным способом, места переборов породы оказываются областями перенапряженными. Величины дополнительной концентрации напряжений в зонах вывалов находятся в прямой зависимости от их глубины. Кроме того, вызываемые при взрывных работах разрушения пород в обнажениях влияют на их состояние, определяя дополнительные отслоения, вывалы, а, в конечном счете, снижение устойчивости породного контура.

Таким образом, качественная картина разрушения породы по длине оконтуривающих шпуров при обычном методе ведения БВР в проходческом забое как горизонтальных, так и вертикальных выработок схожа, хотя и имеет определенные отличия, обусловленные длиной шпура (заходки) и длиной заряда. Взрывание и разрушение породы в любых выработках происходит не в одинаковых условиях: наиболее благоприятных у устья и наименее благоприятных – у дна шпуров. Поэтому при одинаковой величине заряда на единицу длин шпуров объем разрушения (следовательно, и перебор породы) закономерно

увеличивается в глубине массива, у дна оконтуривающего шпура. В большей степени это проявляется в стволах. Кроме того, двойное воздействие взрыва в зоне расположения стаканов (дна шпура) приводит к переборам породы именно в данной зоне. Это необходимо учитывать при контурном взрывании и принимать меры к обеспечению одинаковых условий разрушения породы по всей длине оконтуривающих шпуров. Для этого требуется сводить к минимуму глубину стаканов, располагать оконтуривающие шпуры возможно ближе к проектному контуру выработки и точно выводить на последний дно каждого оконтуривающего шпура. Нужно также принимать меры к уменьшению влияния площадок $A - A$, затрудняющих разрушение массива в зоне III и вызывающих тем самым необходимость увеличения донной части заряда.

Это может быть достигнуто, во-первых, за счет правильного расположения ближайшего ряда отбойных шпуров, во-вторых, за счет смещения по длине оконтуривающих шпуров относительно остальных шпуров комплекта (с тем, чтобы выемка центральной части забоя опережала отбойку приконтурного слоя). В-третьих, требования качества оконтуривания обусловливают необходимость снижения величины зоны трещинообразования, что может быть достигнуто путем применения зарядов ВВ уменьшенного диаметра или снижения давления в зарядной камере за счет специальных конструкций зарядов (рассредоточенных, с увеличенным объемом зарядной камеры).

В [3, 4] для повышения качества оконтуривания горизонтальной выработки, снижения переборов и нарушений приконтурного массива от взрывания оконтуривающих шпуров предлагается перемещение дна этих шпуров в сторону от забоя. В [3] дно оконтуривающих шпуров смещали на 20 – 30 см относительно плоскости забоя, что дало положительный результат. В [4] смещение рекомендуется делать равным примерно половине величины подвигания забоя (рис. 2). В [3] этот способ также рекомендуется при проходке вертикального ствола (рис. 3).

Величина отставания дна оконтуривающих шпуров от забоя ствола принята 20 – 30 см. Данных об эффективности применения данного паспорта БВР не приводится. Следует также отметить, что предложенные параметры этого паспорта не могут быть рекомендованы для современной технологии проходки вертикальных стволов. В рассматриваемом случае диаметр ствола вчерне $D_{вч} = 5,9$ м, длина заходки $l_{зах} = 1,8$ м, длина основного комплекта шпуров $l_{ун} = 2$ м.

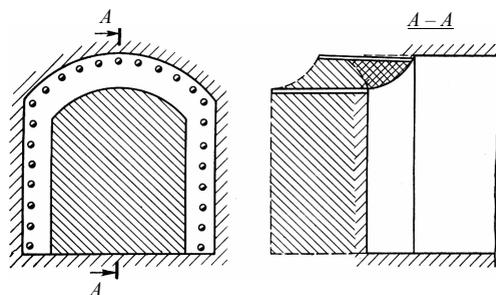


Рис. 2. Схема расположения шпуров с перемещением контурных шпуров в сторону от забоя

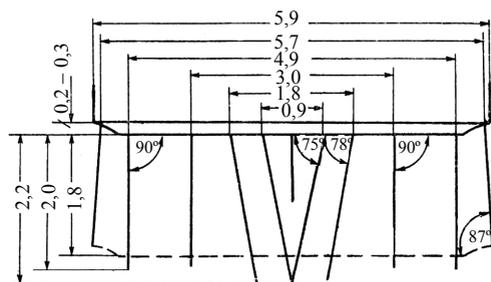


Рис. 3. Схема расположения шпуров паспорта БВР на проходку шахтного ствола

В связи с этим необходимо проведение исследований эффективности способа отбойки породы со смещением (отставанием) дна оконтуривающих шпуров относительно забоя с учетом современных параметров

и требований буровзрывной технологии проходки стволов.

Рассмотрим схему расположения шпуров и основные параметры буровзрывных работ применительно к условиям проходки воздухоподающего ствола №2 на АП «Шахта им. А.Ф. Засядько» (рис. 4). Диаметр ствола в черне $D_{гч} = 8$ м, длина заходки $l_{зах} = 4,0$ м, длина основного комплекта шпуров – $l_{ин} = 4,2$ м.

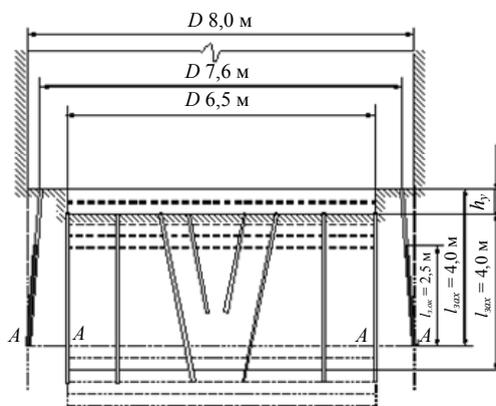


Рис. 4. Предлагаемая схема расположения шпуров для условий проходки воздухоподающего ствола №2 на АП «Шахта им. А.Ф. Засядько»

Отличительные признаки предлагаемой схемы расположения шпуров от традиционной состоят в следующем.

1. Оконтуривающие шпуровы располагаются по одной окружности и отстают от комплекта основных шпуров на величину h_y . Высота уступа, в отличие от предлагаемой в [3] схемы (см. рис. 3), должна быть равной, предположительно, $h_y = 0,5 - 1,5$ м. При меньшей высоте эффект от смещения не будет ощутимым, а при большей высоте возникнут технологические трудности, связанные с бурением шпуров, уборкой породы и т.д.

2. Длина оконтуривающих шпуров за счет перемещения их дна из зоны наиболее «зажатых» пород уменьшена и равна длине заходки $l_{ок} = l_{зах} = 4,0$ м (для них КИШ равен 1,0).

3. Оконтуривающие шпуровы имеют уменьшенный заряд. При этом заряд располагается на большей длине шпуров (2,5 м) за счет применения деревянных брусков, устанавливаемых между патронами ВВ. Передача детонации при этом осуществляется отрезком ДШ. Этот прием позволяет увеличить объем зарядной камеры и, соответственно, уменьшить давление газов взрыва.

4. Внешняя окружность с отбойными шпуровы расположена ближе к оконтуривающим для облегчения отрыва породы последними. Ширина уступа после взрывания основного комплекта шпуров составляет $b_y = 0,75$ м.

Преимуществом данной схемы является уменьшение разрушения боковых пород в нижней части оконтуривающих шпуров за счет смещения их дна из самой удаленной от устья шпуров зоны, а также за счет уменьшения расстояния до обнаженной поверхности при уступной форме забоя. Кроме этого, устраняется присутствующее в традиционных схемах взрывания двойное воздействие взрыва зарядов в нижней части заходки. Верхняя часть оконтуривающих шпуров, не имеющая заряда, не воздействует на боковую поверхность ствола, а уступ «срезается» при взрывании всего комплекта шпуров, не образуя переборов.

Решение задачи определения рациональной высоты уступа в аналитической постановке не представляется возможным из-за достаточно сложной расчетной схемы и большого количества влияющих факторов. Более эффективным и достоверным методом является экспериментальный, выполняемый в конкретных горногеологических условиях непосредственно при проходке шахтного ствола. Тем не менее, для определения параметров схемы расположения шпуров с уступной формой забоя необходимы обоснованные данные о возможной высоте уступа. Наиболее удобный в данном случае численный метод исследований, который позволяет решать подобные геомеханические задачи с достаточным уровнем точности.

Рассмотрим возможность решения этой задачи в плоской постановке, ограничившись рассмотрением взрывного воздействия на линию проектного контура ствола только оконтуривающих шпуров. При этом протяженная часть ствола в качестве объекта исследования не рассматривается; изучению подвергается только торцовая его часть – забой. При таком подходе ствол может быть представлен плоской моделью в виде щели шириной, равной диаметру ствола в проходке $D_{пр}$.

Поскольку шахтный ствол является долговременной капитальной выработкой, закрепленной жесткой монолитной бетонной крепью, фиксируем стены ствола по всей протяженности, за исключением призабойной части, где, в соответствии с технологией проходки, находится незакрепленная часть ствола, опалубка со свежеложенным бетоном и набирающая прочность крепь из монолитного бетона.

Согласно результатам исследований С.В. Борщевского, набор прочности бетона, после которой крепь может создать достаточный отпор смещения породного массива, происходит после 5 суток, что соответствует расстоянию до забоя 20 – 30 м при поточной технологии [5]. С учетом этих данных принимаем протяженность незакрепленной части ствола у забоя равной 24 м.

Размеры исследуемой области должны быть такими, чтобы исключить влияние краевых эффектов.

Поскольку целью исследований является изучение степени влияния только оконтуривающих шпуров, для чистоты эксперимента целесообразно исключить влияние взрывного воздействия врубовых и отбойных шпуров. При этом можно считать, что разрушающее воздействие при их взрывании не оказывает влияния на проектный контур ствола, а действует только в зоне, ограниченной периметром их расположения. Само взрывное воздействие оконтуривающих шпуров в модели может быть представлено исходя из следующих соображений.

Радиальное давление газов взрыва ВВ может быть разложено на ортогональные составляющие (рис. 5). Допустимо считать, что составляющие давления, направленные в сторону соседних оконтуривающих шпуров, не оказывают влияние на разрушение контура ствола, а их совместное влияние формирует кольцо, также симметричное относительно вертикальной плоскости, проходящей через центр ствола.

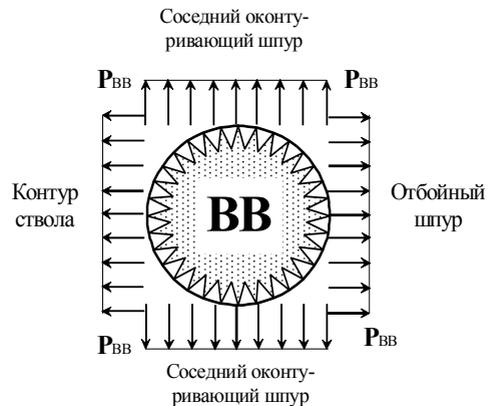


Рис. 5. Схема, характеризующая действие взрыва заряда оконтуривающих шпуров

Таким образом, в плоской модели действие взрыва в шпуре может быть представлено в виде равномерно приложенной нагрузки по длине шпура, соответствующей давлению газов взрыва.

В соответствии с [6], давление в объеме зарядной камеры шпура при плотности заряжения $\Delta = 800 \text{ кг/м}^3$ составляет $P = 320 \text{ МПа}$. Как было сказано выше, для рассматриваемой схемы, задача которой снизить степень разрушения боковых стен ствола, принимается уменьшенный шпуровой заряд при увеличении длины зарядной камеры с 1,8 до 2,5 м. Давление в шпуре при этом снижается до 150 МПа.

Для выполнения исследований используем программный комплекс Phase 2. Расчетная схема и конечно-элементная модель для рассматриваемых условий приведена на рис. 6. Рассматривается участок верти-

кального ствола, забой которого расположен на глубине 1000 м. Ствол диаметром 8 м (ширина щели) моделируется в однородном породном массиве. Размеры области массива пород составляют 200×200 м. Исследуемая область аппроксимирована трехугольными конечными элементами. Крепость вмещающих пород $f = 10$. Физико-механические параметры для построения модели приведены в таблице.

Внешний массив заменен вертикальными и горизонтальными распределенными нагрузками γH , где γ – средневзвешенный объемный вес пород; H – глубина заложения выработки. Рассматриваем гидростатическое поле напряжений ($\lambda = 1,0$).

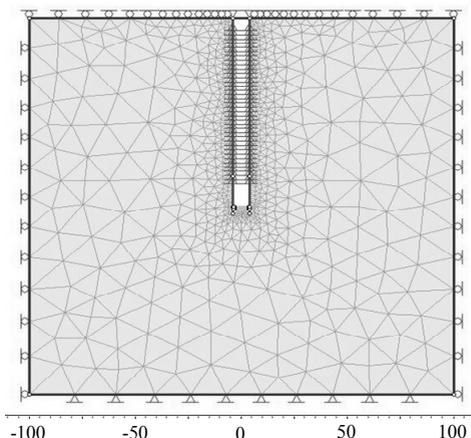


Рис. 6. Расчетная схема и конечно-элементная модель

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ

Таблица

Физико-механический параметр	Значение
Объемный вес пород, γ , МПа/м	$2,5 \cdot 10^{-2}$
Предел прочности на одноосное сжатие, σ_c , МПа	100
Предел прочности на одноосное растяжение, σ_p , МПа	10
Предел прочности на сдвиг, τ , МПа	2,93
Модуль Юнга, E , МПа	$614 \cdot 10^4$
Коэффициент Пуассона, μ	0,35
Модуль сдвига, G , МПа	$1,33 \cdot 10^4$

В качестве критерия разрушения принимаем обобщенный критерий Хоека-Брауна [7]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a, \quad (1)$$

где σ_1 и σ_3 – максимальные и минимальные напряжения в массиве;

m_b – константа Хоека-Брауна для породного массива;

s и a – постоянные величины, учитывающие генезис и состояние (качество) породного массива;

σ_{ci} – предел прочности на одноосное сжатие массива пород в интактном состоянии.

С учетом изложенных подходов, упрощений и установок было проведено исследование

НДС породного массива призабойной части ствола, подвергавшейся взрывному воздействию. При этом выполнялась оценка влияния воздействия оконтуривающих шпуров на проектный контур ствола при различной величине отставания оконтуривающих шпуров от общего комплекта шпуров.

На рис. 7 показан этап моделирования ситуации в забое ствола с заданной высотой породного уступа. На рис. 8 приведен результат определения НДС призабойного незакрепленного участка ствола. Состояние оценивалось на основе strength-фактора, определяемого в ПП «Phase 2». Strength-фактор – некоторая величина, эквивалентная коэффициенту устойчивости k_y . Значение k_y , меньше единицы, означает разрушение массива.

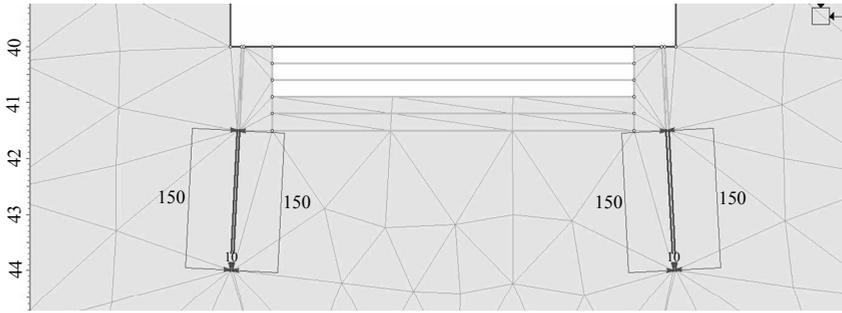


Рис. 7. Взрыв. Отставание устьев оконтуривающих шпуров $h_y = 0,9$ м

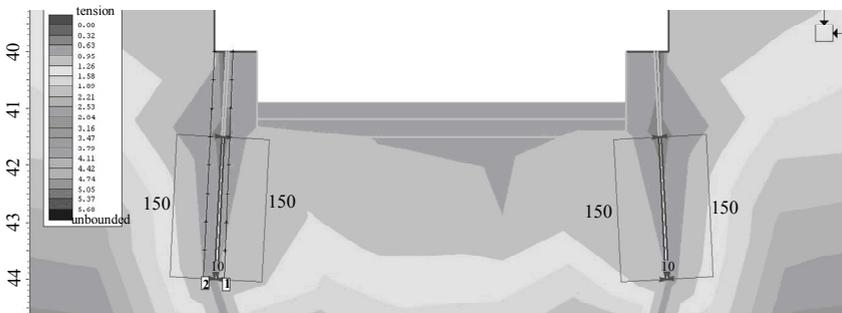


Рис. 8. Распределение strength-фактора в призабойной части ствола после взрывания оконтуривающих шпуров. Высота уступа $h_y = 0,9$ м

На рис. 9 приведены зависимости k_y от величины уступа и расстояния от плоскости забоя по длине оконтуривающего шпура.

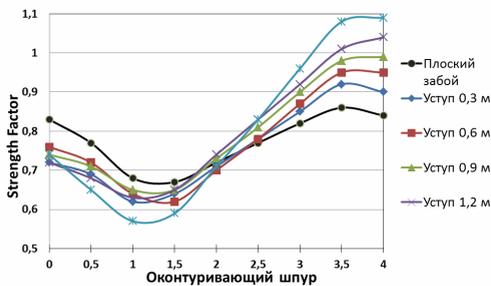


Рис. 9. Зависимость коэффициента устойчивости (strength-фактора) от высоты уступа по глубине шпура (0 – устье шпура, 4 – дно)

Выполненные исследования показали, что при уступной форме забоя ствола (от-

ставании комплекта оконтуривающих шпуров от основной группы) снижается динамическое воздействие на стенки ствола от взрывания оконтуривающих шпуров в нижней части заходки. Максимальный эффект при такой форме забоя для ствола диаметром вчерне 8 м достигается при высоте уступа $h_y = 0,9$ м. Зависимость коэффициента устойчивости (strength-фактора) от высоты уступа носит линейный характер (рис. 10) и описывается выражением:

$$k_y = 0,16h_y + 0,85. \quad (2)$$

При обосновании и выборе параметров буровзрывных работ необходимо применять принципы контурного взрывания, известные из практики проходки тоннелей, горизонтальных и вертикальных горных выработок, в том числе с использованием известных методик и рекомендаций.

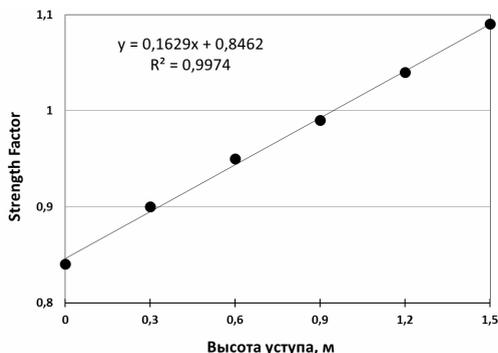


Рис. 10. Зависимость коэффициента устойчивости (strength-фактора) от высоты уступа

Улучшение условий работы крепи при проходке стволов методом контурного взрывания дает возможность в дальнейшем перейти на облегченные виды крепи, выполняющей функции изолирующей оболочки. Перспективным в этом отношении является набрызгбетонная крепь.

Методы контурного взрывания позволяют значительно уменьшить экономиче-

ский ущерб от допускаемых переборов, снизить фактические затраты на проходку стволов, а также повысить долговечность крепи.

ВЫВОДЫ

Основной причиной образования значительных неровностей контура и переборов породы при проходке стволов является существующая технология и параметры буровзрывных работ. Улучшить состояние породного контура после взрывания можно за счет смещения по длине оконтуривающих шпуров относительно остальных шпуров комплекта и снижения давления в зарядной камере за счет специальных конструкций зарядов. При уступной форме забоя ствола снижается динамическое воздействие на стенки ствола от взрывания оконтуривающих шпуров в нижней части заходки. Максимальный эффект при такой форме забоя для ствола диаметром вчерне 8 м достигается при высоте уступа $h_y = 0,9$ м.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюркян Р.А. Повышение эффективности и оптимизация параметров БВР при проходке вертикальных стволов / Р.А. Тюркян // Уголь Украины. – 1996. – № 5-6. – С. 35 – 36.
2. Фисунов В.Д., Фисунов А.В. Разрушаемость породных обнажений в стволах при взрывной проходке // Уголь Украины. – 1989. – № 12. – С. 37 – 38.
3. Барон Л.И. Контурное взрывание при проходке выработок / Л.И. Барон, А.В. Ключников. – М.: Недра, 1967. – 204 с.
4. Бротанек И. Контурное взрывание в горном деле и строительстве / И. Бротанек, Й. Вода. – М.: Недра, 1983. – 144 с.
5. Борщевский С.В. Основные направления повышения прочности монолитной бетонной крепи / С.В. Борщев-

ский, Н.Р. Шевцов // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – Вип. 2. – С. 105 – 108.

6. Кутузов Б.Н. Лабораторные и практические работы по разрушению горных пород взрывом / Б.Н. Кутузов. – М.: Недра, 1981. – 255 с.

7. Hoek E. (2002). *Practical Rock Engineering*. London // Institution of Mining and Metallurgy. – 325 p.

ОБ АВТОРАХ

Солодянкин Александр Викторович – д.т.н., профессор кафедры строительства, геотехники и геомеханики Национального горного университета.

Янкин Александр Евгеньевич – ассистент кафедры геодезии Национального горного университета.