УДК 622.26

А.В. Смирнов, А.П. Аверин

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Изложены натурные и аналитические исследования применительно к подготовительным выработкам шахт Западного Донбасса. Их особенность состоит в том, что каждая выработка проводится с двух сторон одновременно. При этом проходка одной из частей ее ведется навстречу опорному давлению от движущегося забоя лавы. Установлены закономерности деформаций контура выработок от горно-геологических условий. Обоснованы параметры и конструкция комбинированной крепи.

Ключевые слова: парные выработки, напряженно-деформированное состояние, опорное давление, комбинированная крепь.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-28-36

В мировом производстве электроэнергии доля энергоносителей по состоянию на 2016 г. распределена, примерно, следующим образом: уголь — 40,8%, природный газ — 21,6%, гидро — 16,4%, ядерные — 10,6%, нефть — 4,3%, возобновляемые — 6,3%. Подавляющее количество электроэнергии в России (67%) также вырабатывается на тепловых электростанциях. При этом доля угля в структуре потребления энергоносителей составляет около 30%. Кроме того, значительная часть его идет на переработку в кокс и для нужд населения. Таким образом, каменный уголь еще долгие годы будет чрезвычайно востребованным сырьем.

Донецкий угольный бассейн разрабатывается уже более 200 лет. Горные работы в Центральной и Восточной частях месторождения ведутся на больших глубинах в условиях высокого горного давления, больших температур и тектонической нарушенности. Сравнительно молодым в смысле эксплуатации является его Западный участок. Здесь угольные пласты имеют небольшую мощность, редко превышающую 1 м, и малопрочные слабометаморфизированные вмещающие породы, которые существенно обводнены. По этой причине условия разработки угольных пластов в Западном Донбассе также относятся к весьма тяжелым, а шахты условно — к глубоким.

Международная вертикально интегрированная компания ДТЭК ЭНЕРГО является одной из наиболее мощных современных угледобывающих структур. В ее собственности находится 31 шахта, которые расположены на территории Украины и Российского Донбасса (ОАО «Шахтоуправление «Обуховское» и ООО «Донской антрацит»). В Западном Донбассе компания владеет 10 шахтами, каждая из которых добывает более 1 млн т угля в год.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12. С. 28–36.
© А.В. Смирнов, А.П. Аверин. 2017.

В настоящее время угледобывающие предприятия компании в целом обеспечивают добычу около 30 млн т каменного угля различных марок: газовый, тощий, антрацит. При этом серьезной проблемой остается его высокая себестоимость. Анализ затрат на добычу угля показал, что около 20% приходится на проведение и поддержание в эксплуатационном состоянии капитальных и подготовительных выработок. Эти затраты связаны, в основном, с высокой стоимостью металлической арочной крепи, ее последующим ремонтом и ликвидацией последствий вспучивания пород почвы. На этих операциях задействовано около 40% подземных рабочих.

Причины, лежащие в основе сложившейся ситуации, прежде всего, связаны с увеличением глубины залегания угольных пластов и интенсификацией проявлений горного давления. Ухудшающиеся горно-геологические условия ставят новые задачи перед исследователями и инженерами-практиками.

Таким образом, повышение эффективности работы глубоких угольных шахт путем разработки и внедрения инновационных систем крепи на основе геомеханических моделей, адекватно описывающих деформационные процессы, протекающие в породном массиве в окрестности капитальных и подготовительных выработок, все еще остается крупной научной и технической проблемой, имеющей важное народнохозяйственное значение.

Устойчивость выработки существенно зависит от прочности вмещающих пород: чем она выше, тем меньше перемещения на контуре, тем меньше ремонтов требуется выполнять. Повысить прочность вмещающего выработку породного массива можно двумя путями:

- инсталляцией искусственных структурных элементов: анкерных болтов, канатов, стержней;
- нагнетанием цементно-песчаных или полимерных растворов типа Беведан-Беведол.

Комбинация таких элементов в сочетании с рамной поддерживающей крепью пониженной несущей способности позволяет создавать системы крепи, обеспечивающие достаточную устойчивость протяженных выработок. При этом конструкция крепи выработок, находящихся в зоне влияния лавы и вне ее, существенно отличаются.

Применительно к подготовительным выработкам, оконтуривающим струговую лаву, на шахте «Степная» ЧАО «ДТЭК Павлоградуголь», был выполнен комплекс исследований, включающий аналитические расчеты и натурные измерения. Проблема подготовки выемоч-

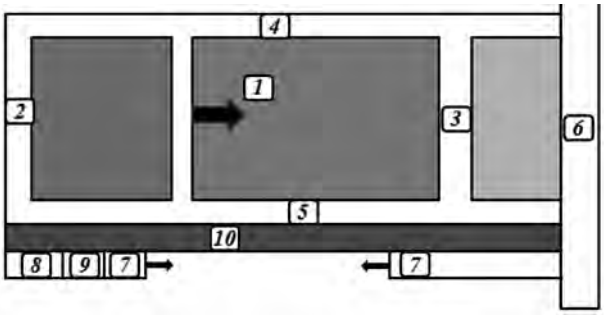

Рис. 1. Схема к отработке столба проведением парных выработок: 1 — выемочный столб; 2 — монтажная камера; 3 — демонтажная камера; 4 — бортовой штрек; 5 — сборный штрек; 6 — магистральная выработка; 7 — парная выработка (бортовой штрек); 8 — участок с чисто анкерной крепью; 9 — участок с рамно-анкерной крепью; 10 — предохранительный целик (4 м)

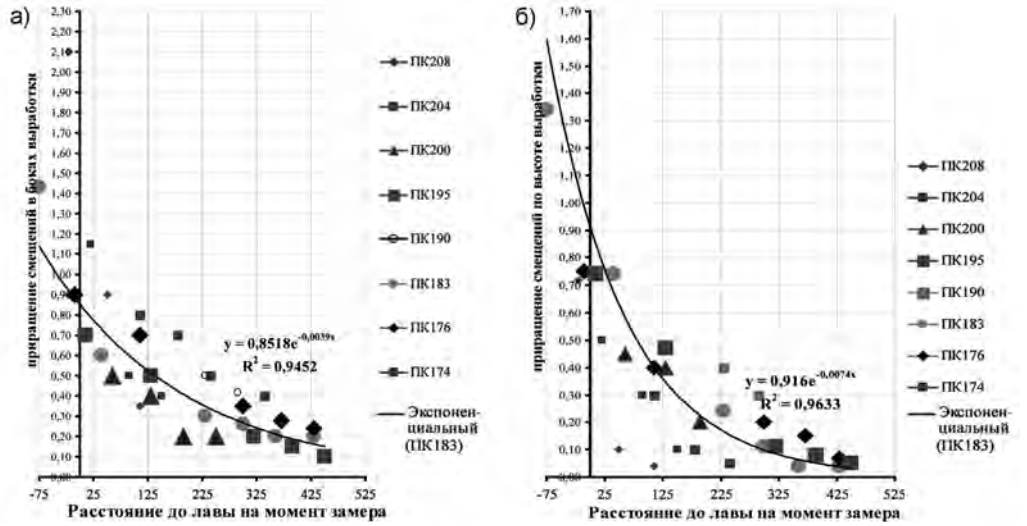

Рис. 2. Изменения величины смещений выработки в зависимости от расстояния до линии очистного забоя: в боках (а); по высоте (б)

ных столбов при скорости подвигания очистного забоя 10—20 м в сутки состоит в том, что проходческие забои имеют существенное отставание. Идея решения этой проблемы заключается в том, чтобы в комплекс существующих оконтуривающих выработок добавить еще одну — штрек, проводимый вприсечку двумя встречными забоями рис. 1.

При этом одна часть парной выработки, которая будет служить впоследствии бортовым штреком для очередной лавы, попадает в зону действия опорного давления от движущегося навстречу забоя лавы. Технология проведения штреков навстречу забою движущейся лавы в достаточной степени отработана на шахте «Степная», где проводился эксперимент по проведению парной выработки при отработке 167-й струговой лавы.

Между выработками был оставлен предохранительный целик шириной 4 м. Проектом предусматривалось наличие участков с установкой только сталеполимерных анкеров с дополнительной установкой канатных анкеров и участков с рамно-анкерной крепью.

На рис. 2, 3 приведены графики изменения во времени вертикальной и горизонтальной конвергенции по мере

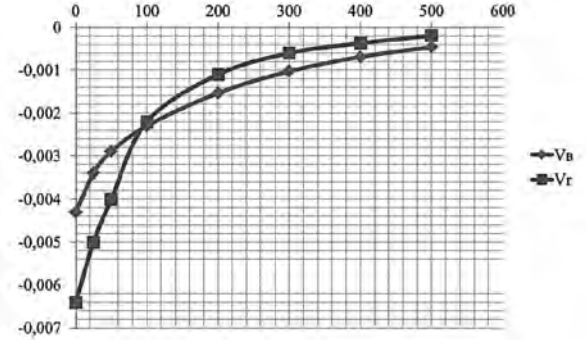

Рис. 3. Изменение скорости вертикальной и горизонтальной конвергенции в зависимости от расстояния до забоя лавы

приближения забоя лавы, полученные по результатам измерений на участках с разными видами крепи, а также скорость нарастания смещений.

$$\Delta U_{верт} = 0,8518e^{-0,004L} \quad (1)$$

$$\Delta U_{гор} = 0,916e^{-0,007L} \quad (2)$$

$$V_{верт} = -0,00341e^{-0,004L} \quad (3)$$

$$V_{гор} = -0,00641e^{-0,007L} \quad (4)$$

Из рис. 2 видно, что горизонтальная и вертикальная конвергенция растет по мере приближения лавы, причем в точках, соответствующих расстоянию 20—25 м от линии забоя, горизонтальные смещения превышают вертикальные, а затем становятся меньше их. Приращение смещений в кровле и почве при подходе лавы на расстояние 20—25 м составляет примерно 0,75 м. После прохода лавы уменьшение сечения по высоте достигло 1,2 м, по ширине — 1,4 м. Таким образом, смещения на участке, изначально поддерживаемом рамно-анкерной крепью, практически совпадают с теми, что имели место на пикете ПК 183, где выработка закреплена только анкерами, и где рамная крепь была установлена непосредственно перед подходом лавы.

Из графиков рис. 3 следует, что на расстоянии, примерно, 70—100 м абсолютное значение скоростей смещения сечения выработки в горизонтальном и вертикальном направлении начинает возрастать, свидетельствуя об интенсификации процессов, протекающих в динамической системе «лава — парные выработки».

Визуальные наблюдения показали, что характер деформаций массива примерно одинаков на всех описанных выше участках: с полным перекрытием анкерной крепью и на участках с рамно-анкерным креплением. При подходе лавы в кровле выработки наблюдаются техногенные трещины, но массив сохраняет целостность. Металлические рамы на этом этапе не деформированы. Видимые деформации имеют место в боках выработки. Наблюдается складывание анкерных подхватов «гармошкой», выдавливание разрушенных пород в боках выработки и разрыв прогонов.

Кроме того, в результате выполнения экспериментальных работ было установлено, что характер деформаций контура выработки, примерно, одинаков как для участков, закрепленных только анкерами с последующей дополнительной установкой рам с целью безопасности выполнения работ, так и для участков, где рамно-анкерное крепление выполнялось изначально, при этом на указанных участках после прохода лавы уменьшение по ширине составляет 1,2—1,4 м, а по высоте 0,7—1,4 м.

При этом крепление присечного штрека только анкерами с полным перекрытием для типичных условий ПСП ШУ «Першотравенское» целесообразно на участках выработки, глубина расположения которых не превышает 400—430 м, а для глубины 430—490 м это возможно при условии, что при сопряжении штрека с лавой крепление бровки осуществляется на ширину не менее 2,0 м. При этом для участков присечного штрека с полным перекрытием анкерной крепью, расположенных на глубине 430—490 м, возможно уменьшение ширины закрепленной бровки до величины 1,5 м при условии установки дополнительной деревянной стойки от кровли пласта до почвы выработки в месте их сопряжения.

Изложенные выше натурные измерения позволили разработать расчетные схемы и перейти к численному моделированию геомеханической системы «лава — парные выработки», которое было выполнено в программной среде PHASE 2 канадской компании Rock science [1]. Последовательно в одном прог-

Таблица 1

Физико-механические свойства пород

Порода	Модуль Юнга, МПа	Коэфф. Пуассона	Прочность породного образца на сжатие, МПа	Коэффициент структурного ослабления	Прочность на сжатие с учетом коэффициентом структурного ослабления, МПа
Аргиллит	3193	0,3	32	0,5	16
Алевролит	2981	0,3	43	0,5	21,5
Уголь	4000	0,3	37,5	0,4	15
Обрушенные породы	226	0,3	7	—	7

раммном модуле моделировались четыре стадии, соответствующие порядку выполнения горных работ [2]:

I стадия — проведение 167-го сборного штрека вне зоны влияния очистных работ;

II стадия — деформирование 167-го сборного штрека при движении забоя 165-лавы;

III стадия — прохождение в окрестности пройденных выработок волны опорного давления 165-й лавы;

IV стадия — воздействие на пройденные выработки очистного пространства от прохода 165-й лавы и волны опорного давления от 167-й лавы.

Исходные данные для расчетов приведены в табл. 1.

Размеры зоны неупругих деформаций определялись в соответствии с критерием Хоека-Брауна [3]:

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

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 нетронутом состоянии.

Для каждой стадии решались упругопластические задачи. При этом, на каждой последующей стадии учитывались расчетные деформации, полученные на предыдущей.

На рис. 4, 5 показано формирование зон разрушения для глубины 490 м на разных стадиях в той последовательности, в которой выполнялось численное моделирование.

Из четырех рассмотренных геомеханических ситуаций наибольший интерес представляет последняя стадия, когда деформации породного массива в окрестности геомеханической системы «лава — парные выработки» становятся максимальными, а устойчивость выработок, соответственно, минимальной. Ее анализ показал следующее.

После прохода как первой (165-й), так и второй (167-й) лавы в зоне разрушенных пород над присечной выработкой образуется зона разгрузки. В пределах этой области породы не разрушены и сохраняют сплошность. Этот факт позволяет с помощью 2-уровневой системы анкеров создать вокруг выработки армопородную конструкцию, несущая способность которой достаточна для удержания веса пород кровли после прохода второй лавы.

Выполнена оценка влияния жесткости охранного элемента, которая регулировалась его размерами и приведенным модулем упругости. В численных расчетах жесткость эквивалентна жесткости деревянной органной крепи, а приведенный модуль упругости принимался либо

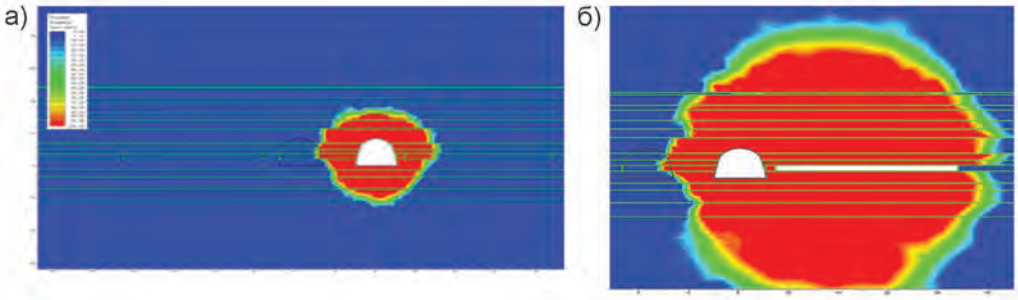

Рис. 4. Зона разрушения вокруг 167-го сборного штрека: стадия 1 — до подхода первой 165-ой лавы (а); стадия 2 — в окне 165-ой лавы (б)

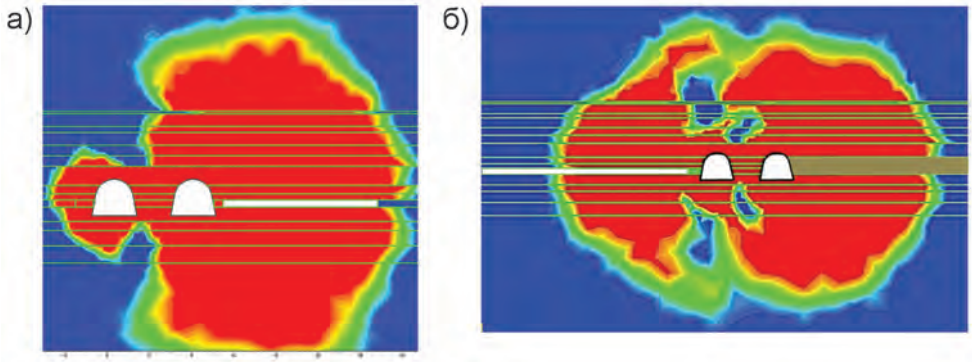

Рис. 5. Зона разрушения вокруг 167-го бортового и 167-го сборного штреков в окне 165-ой лавы: стадия 3 (а); стадия 4 (б)

максимальным, либо вдвое меньшим, что соответствовало различной конструкции органной крепи. В табл. 2 показаны результаты расчетов нагрузки на крепь, величина которой определяется размерами зоны разрушенных пород в кровле.

С уменьшением жесткости охранного элемента нагрузка на крепь возрастает и превышает расчетную для проектной схемы крепи, которая равна 162 т/м.

Одним из эффективных решений, направленных на повышение жесткости охранной конструкции, является установка дополнительных стоек на сопряжение лавы с примыкающей выработкой. Стойки устанавливаются между кровлей пласта и почвой выработки. Расчетная схема к определению размеров зоны неупругих деформаций и нагрузки на крепь для ширины закрепленной бровки 2,0, 1,5 и 1,0 м при наличии дополнительной стойки и максимальной жесткости охранного элемента приведена на рис. 6.

Следующая часть численного моделирования была направлена в сторону оценки работоспособности анкерной си-

Таблица 2

Нагрузка на крепь

$l_{ср}$ = 2,0 м	E = 4000 МПа	Q_1 = 162,53 т/м	E = 2000 МПа	Q_2 = 184,51 т/м
$l_{ср}$ = 1,5 м	E = 4000 МПа	Q_5 = 259,35 т/м	E = 2000 МПа	Q_4 = 185,74 т/м
$l_{ср}$ = 1,0 м	E = 4000 МПа	Q_3 = 302,58 т/м	E = 2000 МПа	Q_6 = 346,54 т/м

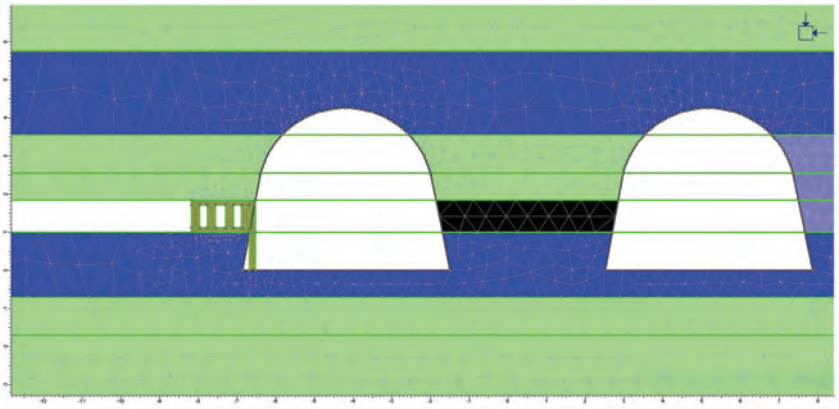

Рис. 6. Расчетная схема с учетом установки дополнительной стойки

стемы в присечной выработке, которая состояла из 17 сталеполимерных анкеров первого уровня и одного контактного анкера второго уровня.

На рис. 7 показан вариант геомеханической ситуации при укреплении бровки шириной 2,0 м, откуда следует, что при ширине бровки 2,0 м зона разгрузки в кровле выработки имеет достаточные размеры и такое месторасположение, при котором канатный анкер, закрепленный в ней, выполняет свои функции.

При этом нагрузка на крепь не превышает проектную. При уменьшении размера закрепленной части бровки размер зоны разгрузки уменьшается и перемещается вправо. Канатный анкер при этом не выполняет своей функции, а нагрузка на крепь превышает проект-

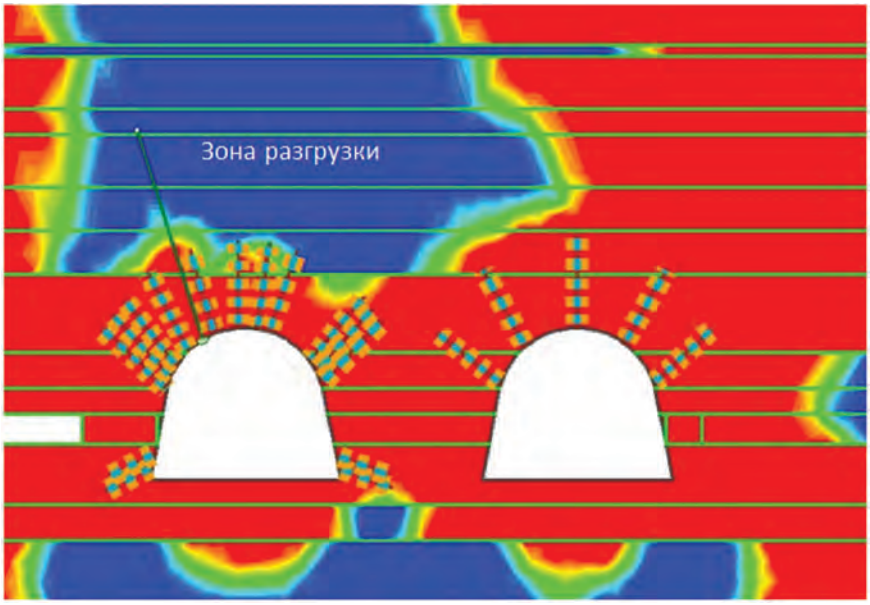

Рис. 7. Стабилизация зон разрушения над 167-м бортовым штреком при ширине бровки $l_{бровки}$ = = 2 м (глубина разработки H = 490—430 м, средняя $H_{ср}$ = 460 м)

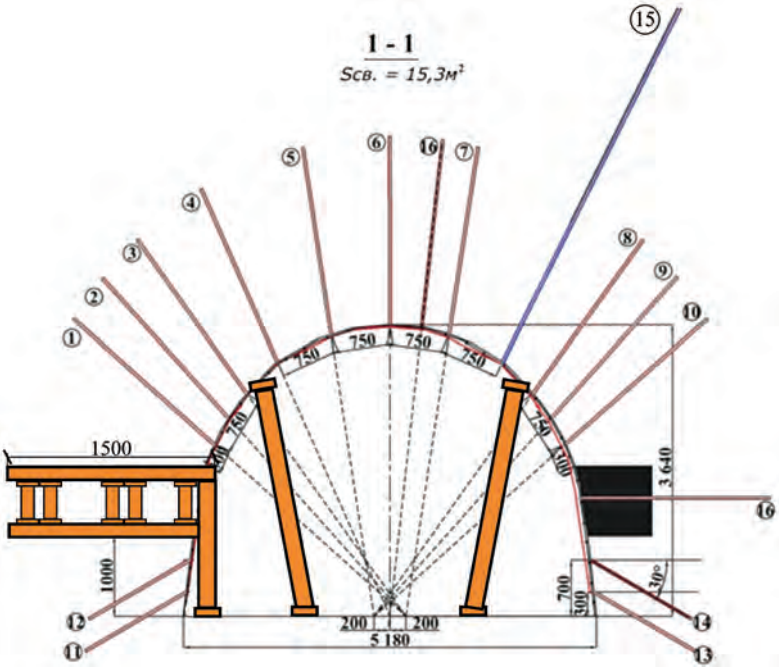

Рис. 8. Поддержание присечной выработки анкерами с установкой дополнительной стойки

ную. Анкеры первого уровня при малой ширине бровки работают в наиболее неблагоприятном режиме. Поскольку сталь в два раза хуже сопротивляется напряжениям сдвига, то весьма вероятно разрушение анкеров при ширине бровки меньшей 2 м.

Однако, ширина бровки может быть уменьшена при установке дополнительной стойки, которая как было показано выше, повышает жесткость охранной конструкции. На рис. 8 показана конструкция комбинированной крепи на участке присечной выработки с анкерной крепью, включающая дополнительные стойки.

Численный анализ показал, что уже при ширине бровки 1,0 м зона разгрузки имеет достаточные размеры для закрепления канатного анкера, а в обычных анкерах не возникают опасные касательные напряжения.

Таким образом, доказано, что в зависимости от глубины расположения выработок можно управлять эффективностью функционирования геомеханической системы «лава — парные выработки» с помощью элементов охранных конструкций, шириной закрепленной бровки и наличием дополнительных стоек жесткости.

Выводы

1. Установлено, что вертикальная и горизонтальная конвергенции контура подготовительной выработки, находящейся в зоне влияния лавы, подчиняются экспоненциальному закону и зависят в основном от расстояния до забоя очистной выработки.

2. Выполнено численное моделирование геомеханической ситуации для выработки с комбинированной крепью, находящейся в зоне влияния лавы.

3. Предложена конструкция комбинированной крепи для подготовительных выработок, находящихся в зоне влияния лавы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шашенко А. Н.*, *Солодянкин А. В.*, *Смирнов А. В.* Пучение пород почвы в выработках угольных шахт. Монография. — Днепропетровск: ООО «ЛизуновПресс», 2015. — 256 с.
2. *Гапеев С. Н., Григорьев А. Е., Логунова А. О.* Критериальная величина остаточного сечения конвейерного штрека, используемого повторно // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. — 2015. — Вип. 2 (16). — С. 90—99.
3. *Hoek E., Brown E. T.* Practical estimates of rock mass strength. Intnl. J. Rock Mech. & Mining Sci. &Geomechanics Abstracts. 1997. 34 (8), pp. 1165—1186. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Смирнов Андрей Викторович — кандидат политических наук,
член Академии горных наук РФ,
советник генерального директора по стратегическим вопросам,
АО «Шахтоуправление «Обуховская»,
Аверин Андрей Петрович — кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, ИПКОН РАН,
e-mail: averin.andrey@gmail.com.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 12, pp. 28–36.

UDC 622.26

A.V. Smirnov, A.P. Averin

STABILITY OF UNDERGROUND ENTRIES IN COMPLICATED MINING AND GEOLOGICAL CONDITIONS

Field and analytical research in the preparatory mine workings are described to reference of the coal mines of the Western Donbass. Their peculiarity consists in the fact that each pillar roadway is carried out from two sides at the same time. In this case, the excavation of one of its parts is carried out against the bearing pressure from the moving longwall face. The patterns of deformation of the contour of pillar roadway from mining and geological conditions are established. The parameters and design of the combined bolting are justified.

Key words: pillar roadway, stress-strain state, bearing pressure, combined bolting.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-28-36

AUTHORS

Smirnov A.V., Candidate of Political Sciences, Member of Academy of Mining Sciences of Russian Federation, Advisor to General Director for Strategic Issues,
JSC «Shakhtoupravlenie Obukhovskaya», Rostov Region, Russia,
Averin A.P., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia,
e-mail: averin.andrey@gmail.com.

REFERENCES

1. Shashenko A. N., Solodyankin A. V., Smirnov A. V. *Puchenie porod pochvy v vyrabotkakh ugol'nykh shakht*. Monografiya (Swelling of floor rocks in coal mines. Monograph), Dnepropetrovsk, OOO «LizunovPress», 2015, 256 p.
2. Gapeev S. N., Grigor'ev A. E., Logunova A. O. *Suchasni resursoenergozberigayuchi tekhnologiï girnichogo virobnitstva*. 2015, no 2 (16), pp. 90—99.
3. Hoek E., Brown E. T. Practical estimates of rock mass strength. *Intnl. J. Rock Mech. & Mining Sci. &Geomechanics Abstracts*. 1997. 34 (8), pp. 1165—1186.