

УДК 622.831

И.Г. Сахно, канд. техн. наук, доцент,
Н.Н. Касьян, д-р техн. наук, профессор
(ГВУЗ «ДонНТУ»)

**УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ
СОСТОЯНИЕМ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ВОКРУГ ВЫРАБОТОК,
ПОДДЕРЖИВАЕМЫХ ЗА ЛАВОЙ**

I.G. Sahno, канд. техн. наук, доцент,
M.M. Kasyan, д-р техн. наук, професор
(ДВНЗ «ДонНТУ»)

**УПРАВЛІННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИМ СТАНОМ МАСИВУ
ГІРСЬКИХ ПОРІД НАВКОЛО ВИРОБОК, ЯКІ ПІДТРИМУЮТЬСЯ ЗА
ЛАВОЮ**

I.G. Sahno, Ph.D. (Tech.), Associate Professor,
N.N. Kasyan, D. Sc (Tech.), Professor
(SHEI «DonNTU»)

**CONTROL OF THE STRESS-STRAIN STATE IN THE ROCKS AROUND
THE PREPARATORY ROADWAY SUPPORTED BEHIND THE
LONGWALL**

Аннотация. Обеспечение устойчивости подготовительных выработок в зоне влияния очистных работ - одна из основных проблем возникающих при эксплуатации угольных шахт. Целью исследований, представленных в статье, является изучение изменения напряженно деформированного состояния горного массива вокруг подготовительной выработки при переходе ее в зону поддержания позади очистного забоя и разработка на основе полученных результатов способа обеспечения устойчивости подготовительной выработки за лавой. Исследование проводилось методом конечных элементов. В результате моделирования установлено, что при жестком охранном сооружении после обрушения непосредственной кровли в основной кровле имеют место две характерные зоны предельных максимальных главных напряжений. Со стороны пласта они в 5 раз превышают предел прочности. То есть, наиболее вероятно, что разрушение основной кровли будет происходить со стороны пласта. После чего обрушенные породы своим весом полностью опираются на крепь подготовительной выработки, что приводит к ее деформированию. Основной резерв повышения устойчивости подготовительной выработки заключается в управлении временем и местом разрушения основной кровли на границе с выработанным пространством, для обеспечения ее зависаний. Предложен способ охраны подготовительных выработок, основанный на принудительном невзрывном обрушении породной консоли и показана его эффективность.

Ключевые слова: горная выработка, напряжения, деформации, разрушение, обрушение, кровля.

Введение. Одним из основных условий эффективной и безопасной работы шахт Украины является обеспечение эксплуатационного состояния горных выработок при минимальном расходе материалов.

Мировой опыт поддержания горных выработок показывает, что их устойчивость определяется напряженно-деформированным состоянием окружающего породного массива. Разработанные на сегодня способы охраны выработок, основаны на активном и пассивном воздействии на массив путем его разгрузки или укрепления, исходя из учета горно-геологической ситуации на момент проведения выработки.

С развитием горных работ при очистной выемке угля подготовительная выработка и окружающий ее массив испытывает влияние опорного давления впереди и позади очистного забоя. Изменение характера и интенсивности деформационных процессов в окружающих выработку породах на больших глубинах стала причиной того, что большинство известных способов поддержания, технологические и технические решения исчерпали свои возможности в части обеспечения устойчивости выработок.

Известно, что наибольшие смещения наблюдаются в подготовительных выработках и процессы, происходящие вокруг этих выработок, наиболее сложные. В горной практике выделяют несколько характерных этапов существования подготовительной выработки связанных, как правило, с попаданием ее в ту или иную зону влияния очистного забоя [1-4]. При этом максимальное влияние горного давления наблюдается на участках выработок поддерживаемых за лавой. Выработки, поддерживаемые в этой зоне, полностью ремонтируются не менее одного раза.

По существующим представлениям позади очистного забоя выделяются зоны интенсивных смещений и стационарного опорного давления [5]. Установлено, что размер зоны интенсивных смещений зависит от состава пород кровли. Чем прочнее породы, тем больше размер зоны интенсивных смещений и наоборот. На интенсивность и величину смещений на этом этапе влияют прочностные свойства вмещающих пород, мощность и слоистость пород основной кровли, тип охранного сооружения возводимого за лавой и его геометрические размеры.

Целью исследований было изучение изменения напряженно деформированного состояния (НДС) массива вокруг подготовительной выработки при переходе ее в зону поддержания позади очистного забоя, выявление основных причин ее деформирования и разработка на основе полученных результатов способа обеспечения устойчивости подготовительной выработки за лавой.

Методы исследований. Исследование кинетики сдвижений пород в натуральных условиях возможно только с помощью отслеживания динамики их смещений различными методами измерений, например, по перемещению глубинных реперов, ультразвуковыми и акустическими методами. Однако проведение таких измерений на участке выработки поддерживаемой за лавой достаточно сложно реализовать. Поэтому для достижения поставленной цели изучение НДС породного массива в рассматриваемом случае проводили путем математического моделирования методом конечных элементов (МКЭ).

Реализация МКЭ осуществлялась в программном комплексе ANSYS, что позволило получить высокое качество визуализации процесса и необходимую информацию для проведения анализа результатов.

Теоретическая часть. Моделировалась выработка арочной формы, поддерживаемая за лавой отработывающей пласт угля мощностью 1,5м на глубине 800м. Залегание пород условно принято горизонтальным. Непосредственная кровля представлена алевролитом мощностью 2,5м, прочностью на одноосное сжатие 50МПа. Основная кровля - песчаник мощностью 6,0м, прочностью 70МПа. Породы почвы - аргиллит с прочностью на одноосное сжатие 40МПа. Исходные данные для моделирования были взяты из кадастра физических свойств горных пород [6] для условий Донецко-Макеевского угленосного района. В качестве способа охраны выработки выбрана полоса из БЖБТ с деревянными прокладками между блоками. Решалась объемная задача в нелинейной постановке.

Материал, имитирующий горные породы, описывали базовой изотропной моделью Друкера-Прагера (исходные данные – модуль упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент сцепления, угол внутреннего трения, угол дилатансии).

В качестве рабочей была принята первая теории прочности, так как она удовлетворительно описывает поведение хрупких материалов, которыми и являются горные породы, а, кроме того, позволяет проводить анализ напряжений с учетом их знака, то есть отдельно анализировать зоны растягивающих и сжимающих напряжений, что актуально для решаемой задачи. Результаты моделирования приведены на рисунках 1-4, 6-7, где представлены изополя распределения алгебраически наибольших σ_1 и наименьших σ_3 главных напряжений.

Так как, для горных пород предельные напряжения на растяжение $[\sigma_p]$ и на сжатие $[\sigma_c]$ различны, то условие прочности выражается в виде

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_1 \leq [\sigma_p]; \\ |\sigma_3| \leq [\sigma_c] \end{array} \right\} \quad (1)$$

Моделировали поэтапное изменение геомеханической ситуации в породах вмещающих подготовительную выработку за лавой. Первый этап – сразу после выемки угля и возведения охранного сооружения в выработанном пространстве зависят породы непосредственной и основной кровли (рис. 1, 2). Предельное состояние определяли по условию (1). На приведенных картинах распределения напряжений черным цветом изображены зоны, в которых возникающие напряжения больше предельных. При анализе исходили из представлений, что разрушение пород происходит в определенной последовательности по мере возникновения запредельных напряжений, при этом каждое разрушение приводит к изменению поля напряжений

Результаты и их обсуждение. На рис. 1, 2 видно, что зоны запредельных напряжений σ_3 формируются в боку выработки со стороны нетронутого пласта.

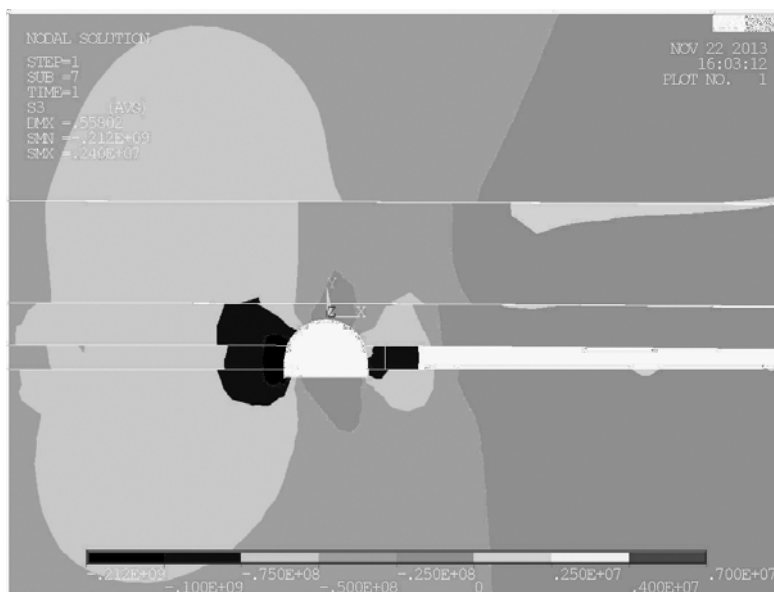


Рисунок 1 – Распределение главных напряжений σ_3 вокруг горной выработки, поддерживаемой за лавой (этап 1)

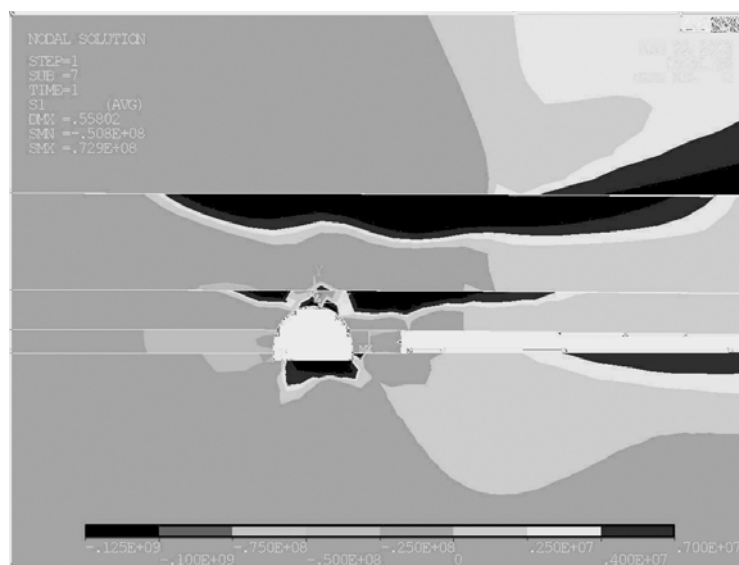


Рисунок 2 – Распределение главных напряжений σ_1 вокруг горной выработки, поддерживаемой за лавой (этап 1)

Максимальная величина σ_3 в непосредственной кровле со стороны пласта 100МПа, что в 2,5 раза превышает предел прочности на одноосное сжатие. Зоны запредельных напряжений σ_1 формируются над охранным сооружением выше нейтральной оси слоя непосредственной кровли, а также в породах основной кровли. Величина σ_1 в непосредственной кровле над охранным сооружением достигает 20МПа, что в 5 раз превышает предел прочности на одноос-

ное растяжение пород непосредственной кровли, поэтому, учитывая близость свободной поверхности, наибольшая вероятность первичного разрушения кровли именно в этом месте. Таким образом, при своевременном возведении охранного сооружения непосредственная кровля обрушается над ним, что приводит к перераспределению напряжений в массиве. Вокруг подготовительной выработки на этом этапе развита зона разрушенных пород размерами $1,3-2R$ радиуса выработки (R) в кровле и почве и $2,3R$ в боку выработки.

После обрушения непосредственной кровли (этап 2) зона разрушенных пород вокруг подготовительной выработки растет и на этом этапе уже достигает размеров $2,6-3,2R$ (рис. 3, 4).

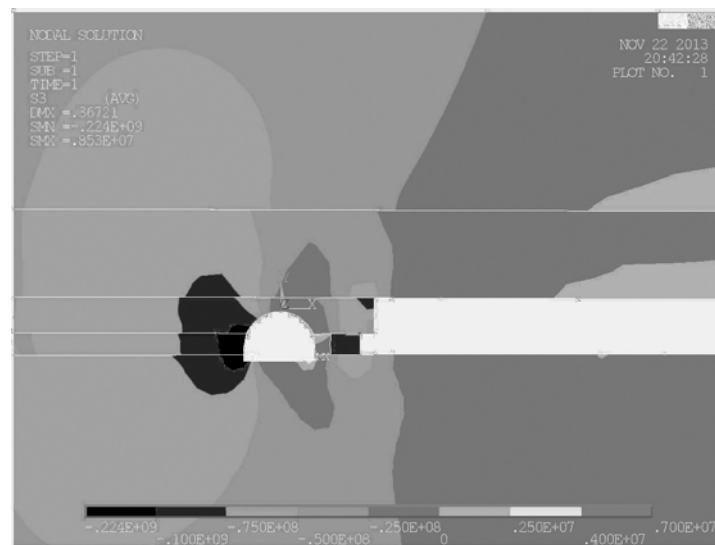


Рисунок 3 – Распределение главных напряжений σ_3 вокруг горной выработки, поддерживаемой за лавой (этап 2)

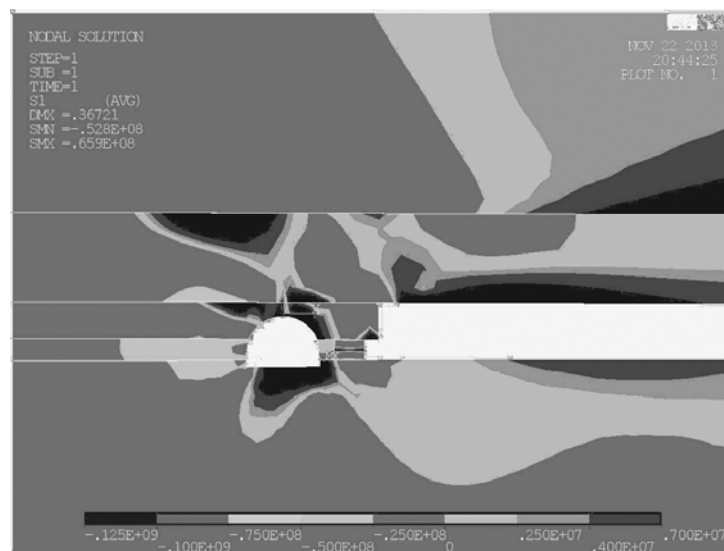


Рисунок 4 – Распределение главных напряжений σ_1 вокруг горной выработки, поддерживаемой за лавой (этап 2)

Зона растягивающих напряжений в основной кровле также растет. При этом имеют место две характерные зоны предельных главных напряжений σ_1 . Первая локализована над охранным сооружением, вторая со стороны нетронутого пласта. Причем со стороны пласта σ_1 достигают 35 МПа, что в 5 раз выше предела прочности на растяжение и размеры предельной зоны растяжения значительно больше, чем над охранным сооружением, где максимум σ_1 равен 6,5 МПа. То есть наиболее вероятно, что первичное разрушение основной кровли будет происходить со стороны пласта. Учитывая, что в непосредственной кровле ниже места вероятного разрушения основной кровли, возникающие напряжения превышают предельные напряжения и на растяжение $[\sigma_p]$ и на сжатие $[\sigma_c]$ трещины достигнут контура выработки, и обрушенные породы своим весом полностью лягут на крепь, что приведет к ее деформированию.

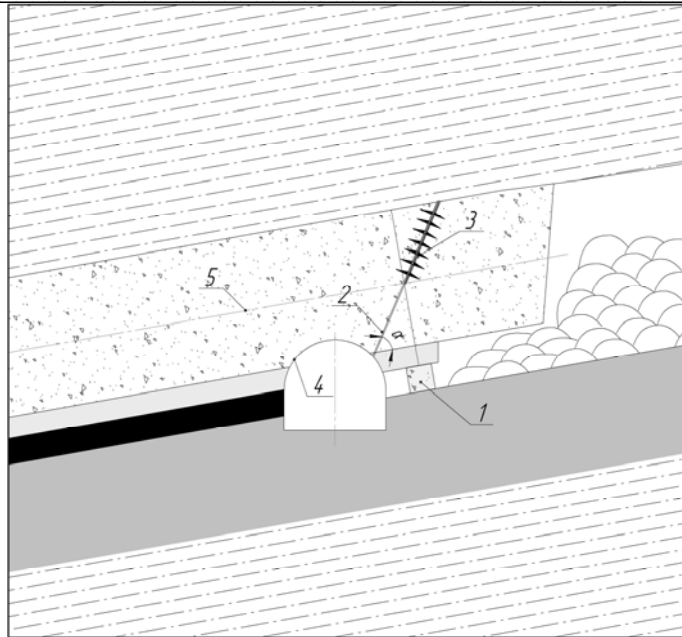
Естественно, что чем длинней консоль основной кровли со стороны выработанного пространства, тем большие напряжения возникают в массиве и тем больше нагрузка на крепь штрека и ее деформирование при обрушении консоли. Возникающие напряжения вблизи контура выработки значительно превышают несущую способность арочных крепей, поэтому противостоять разрушению пород и их деформациям в полость выработки традиционным способом весьма сложно.

Таким образом, основной резерв повышения устойчивости подготовительной выработки, поддерживаемой за очистным забоем, заключается в изменении НДС массива путем предотвращения зависания основной кровли на границе с выработанным пространством, а также управлении временем и местом ее разрушения.

При этом минимизация энергозатрат на принудительное обрушение консоли может быть достигнута за счет инициации разрушения в зоне естественных растягивающих напряжений (запредельных главных напряжений σ_1) выше нейтральной оси зависающего слоя пород основной кровли.

Технически предлагаемая идея может быть реализована, например, в способе охраны подготовительных выработок [7] (рис. 5), который включает возведение охранного сооружения вслед за лавой, бурение скважин из подготовительной выработки, таким образом, чтобы ось скважины проходила через точку, образованную пересечением нейтральной оси зависающего слоя основной кровли и нормали к напластованию проведенной из центра масс охранного сооружения, а длину скважины определяют из соотношения

$$l_{скк} = \left[\left(h_{нк} + \frac{h_{ок}}{2} \right) / \sin \alpha \right] + \left[\frac{h_{ок}}{2} / \sin \alpha \right]$$



1 – охранный сооружение, 2 – разгрузочная скважина, 3 – заряд НРС,
4 – подготовительная выработка, 5 – основная кровля, 6 – непосредственная кровля.
Рисунок 5 – Способ охраны подготовительных выработок пройденных по пласту

где $h_{нк}$ - мощность пород непосредственной кровли пересекаемой скважиной, м; $h_{ок}$ - мощность пород основной кровли, м; α - угол наклона скважины к плоскости пласта, град.

При этом донную часть скважины заполняют невзрывчатым разрушающим составом (НРС) [8] на величину

$$l_{\partial} = l_{скк} - \left[(h_{нк} + \frac{h_{ок}}{2}) / \sin \alpha \right],$$

а устьевую ее часть герметизируют.

Разрушение зависающих со стороны выработанного пространства пород с помощью НРС не вызывает значительного повышения температуры, динамического воздействия на породы и может применяться в условиях пластов высокой газоносности и выбросоопасности.

Ориентация оси скважины таким образом, чтобы она проходила через точку, образованную пересечением нейтральной оси зависающего слоя основной кровли и нормали к напластованию проведенной из центра масс охранного сооружения, позволяет создать дополнительные растягивающие напряжения в зоне образования естественных растягивающих напряжений выше нейтральной оси изгибающейся зависающей консоли, что дает возможность минимальными усилиями с учетом естественных геомеханических деформационных процессов создать направленное обрушение пород основной кровли, и, таким образом, создать разгрузку охраняемой выработки и повысить ее устойчивость.

Длина скважины, рассчитанная по предложенной зависимости, учитывает строение пород основной и непосредственной кровли, что позволяет макси-

мально эффективно создать условия для принудительного обрушения зависающей консоли основной кровли в конкретных горно-геологических условиях. Герметизация устьевой части скважины способствует предотвращению произвольного выброса НРС в процессе его гидратации, что повышает надежность способа.

Картины распределения главных напряжений вокруг подготовительной выработки после принудительного обрушения основной кровли представлены на рисунках 6, 7.

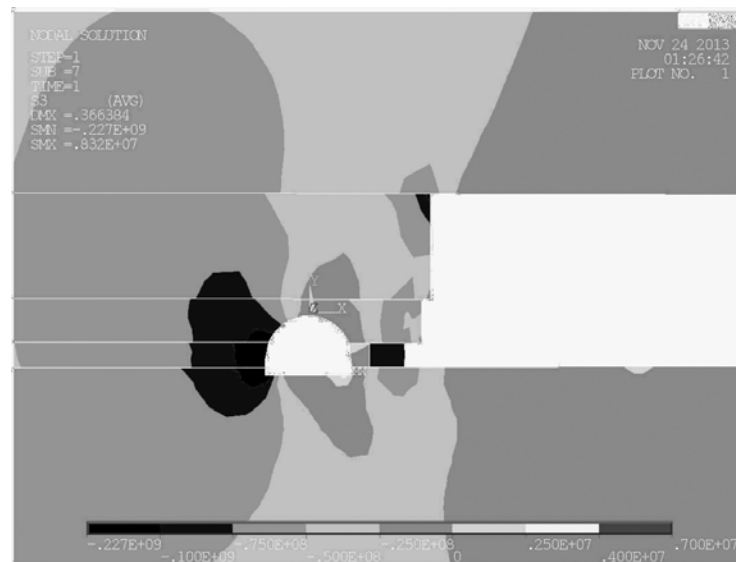


Рисунок 6 – Распределение главных напряжений σ_3 вокруг горной выработки поддерживаемой за лавой после принудительного обрушения основной кровли над охранным сооружением

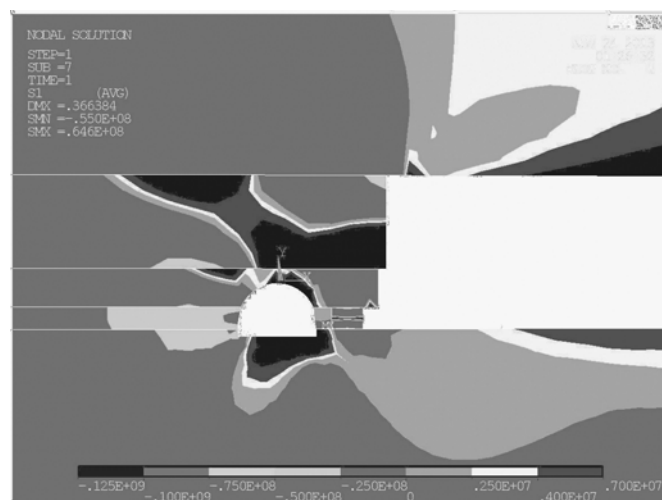


Рисунок 7 – Распределение главных напряжений σ_1 вокруг горной выработки поддерживаемой за лавой после принудительного обрушения основной кровли над охранным сооружением

Из рисунка 7 видно, что растягивающие напряжения в приконтурной области меньше, чем для этапа 2 (рис. 4). Зона предельных растягивающих напряжений в приконтурной области также меньше. Зона разрушенных пород вокруг подготовительной выработки достигает размеров 2,0-2,8R (рис. 6, 7). Но в кровле выработки эта зона меньше, чем на этапе 2.

Породы основной кровли над подготовительной выработкой находятся в зоне предельных напряжений $[\sigma_p]$, учитывая локализацию зон повышенных σ_1 , можно предположить формирование трещин в породах основной кровли и обрушение основной и непосредственной кровли. Обрушенные породы своим весом нагрузят крепь, однако поскольку вес пород значительно меньше, чем на этапе 2, степень деформирования контура выработки будет меньше.

Выводы. Результаты проведенных исследований показывают, что при охране подготовительной выработки за лавой жестким охранным сооружением (БЖБТ), в основной кровле формируются две характерные зоны предельных максимальных главных напряжений σ_1 . Эти зоны локализуются со стороны выработанного пространства над охранным сооружением и со стороны нетронутого пласта. Причем со стороны пласта они в 5 раз превышают предел прочности $[\sigma_p]$. Что дает основание предполагать, что первоочередное разрушение основной кровли будет происходить именно в этой области. Обрушенные породы основной и непосредственной кровли своим весом полностью опираются на крепь подготовительной выработки, что приводит к ее деформированию.

Предложен способ охраны подготовительных выработок, основанный на принудительном невзрывном обрушении породной консоли, зависящей со стороны выработанного пространства. А также приведены формулы, необходимые для расчета параметров способа.

Проведено численное моделирование, результаты которого указывают на реальную возможность повышения устойчивости выемочных выработок при реализации предложенного способа охраны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ардашев, К.А. Геомеханические основы выбора и совершенствования бесцементных способов охраны и поддержания подготовительных выработок / К.А. Ардашев, И.П. Бажин // Уголь. –1979. – №3. – С. 23-31.
2. Горное давление в подготовительных выработках угольных шахт / И.Л. Давыдович, И.П. Бажин, Ю.П. Коренной и др. – М.: Недра, 1971. – 228 с.
3. Черняк, И.Л. Выбор сопротивления крепи подготовительных выработок в зоне опорного давления / И.Л. Черняк, Ю.И. Бурчаков, Е.М. Серебренник // Уголь. –1983. – №4. – С. 16-18.
4. Борисов, А.А. Механика горных пород и массивов / А.А. Борисов. – М.: Недра, 1980. – 360 с.
5. Болгожин, Ш.А. Геомеханические условия охраны подготовительных выработок при отработке угольных пластов / Ш.А. Болгожин, Ф.И. Клиновицкий – Алма-Ата : Наука, 1983. – 86 с.
6. Мельников Н. В. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / Н. В. Мельников, В. В. Ржевский, М. М. Протодьяконов – М.:Недра, 1975. 279 с.
7. Пат. № 100270, МПК(2012.01) E21D 11/00, E21F 15/00 Спосіб охорони підготовчих виробок пройдених по пласту / І.Г. Сахно, М.М. Касьян (Україна). – а2010 15564; заявл. 23.12.2010, опубл. 10.12.2012, бюл. № 23. – 4с.:ил.

8. ТУ У В.2.7-26.5-24478901-004:2007 Невибухова руйнуюча речовина. Технічні умови. – на заміну ТУ У БВ 2.7.00030937.089397. Без обмеження терміну дії. – Харків: Госстандарт. Харківський центр стандартизації и аерології, 2007-14с.

REFERENCES

1. Ardashev, K.A. *Geomechanical basis selection and improvement pillarless ways of protecting and maintaining the development workings* / K.A. Ardashev and I.P. Bazhin // Coal. –1979. – №3. – P. 23-31.
2. *Gornoe davlenie v podgotovitel'nyh vyrabotkah ugol'nyh shaht* [Rock pressure in the roadways coal mines] / I.L. Davydovich, I.P. Bazhin, Ju.P. Korennoj and other. – M.: Nedra, 1971. – 228 p.
3. Chernjak, I.L. *Choosing roof supports resistance development workings in the area of the reference pressure* / I.L. Chernjak, Ju.I. Burchakov, E.M. Serebrenik // Coal. –1983. – №4. – P. 16-18.
4. Borisov, A.A. *Mehanika gornyh porod i massivov* [Rock mechanics and arrays] / A.A. Borisov. M.: Nedra, 1980. – 360 p.
5. Bolgozhin, Sh.A. *Geomechanicheskie uslovija ohrany podgotovitel'nyh vyrabotok pri otrabotke ugol'nyh plastov* [Geomechanical conditions for the protection of development workings when mining coal seams] / Sh.A. Bolgozhin, F.I. Klinovickij – Alma-Ata : Nauka, 1983. – 86 p.
6. Mel'nikov N. V. *Spravochnik (kadastr) fizicheskikh svoystv gornyh porod* [Handbook (cadastre) physical properties of rocks] N. V. Mel'nikov, V. V. Rzhetskij, M. M. Protod'jakonov – M.:Nedra, 1975. 279 p.
7. Pat. № 100062, МРК(2012.01) E21D 11/00, E21F 15/00 *Method for protection of preparatory workings penetrated by seam* / I.G. Sahno, M.M. Kas'jan, (Ukraine). – a2010 15564; zajavl. 23.12.2010, publ. 10.12.2012; Bjul. №23. – 4p.:il.
8. ТТС У В.2.7-26.5-24478901-004:2007 *Non-explosive destroying matter*. Tts. – on replacement /ТУ У БВ 2.7.00030937.089397. Without limitation of term of action. Kharkov: National standard. Kharkov center of standardization and aerology, 2007-14p.

Об авторах

Сажно Иван Георгиевич - канд. техн. наук, доцент кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых» Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет» (ГВУЗ «ДонНТУ»), Донецк, Украина, sahno_i@mail.ru.

Касьян Николай Николаевич – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых» Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет» (ГВУЗ «ДонНТУ»), Донецк, Украина.

About the authors

Sahno Ivan Georgievich, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, State Higher Educational Institution “Donetsk National Technical University”, Donetsk, Ukraine, e-mail: sahno_i@mail.ru.

Kas'jan Nikolaj Nikolaevich, Doctor of Nechnical Sciences (D. Sc.), Professor, State Higher Educational Institution “Donetsk National Technical University”, Donetsk, Ukraine.

Анотація. Забезпечення стійкості підготовчих виробок в зоні впливу очисних робіт - одна з основних проблем, що виникають при експлуатації вугільних шахт. Метою досліджень представлених у статті є вивчення зміни напружено деформованого стану гірського масиву навколо підготовчої виробки при переході її в зону підтримки позаду очисного вибою та розробка на основі отриманих результатів способу забезпечення стійкості підготовчої виробки за лавою.

Дослідження проводилося методом кінцевих елементів. У результаті моделювання встановлено, що при жорсткому охоронному спорудженні після обвалення безпосередньої покрівлі в основній покрівлі мають місце дві характерні зони граничних максимальних головних напружень. З боку пласта вони в 5 разів перевищують межу міцності. Тобто найбільш ймовірно, що руйнування основної покрівлі відбуватиметься з боку пласта. Обвалені породи сво-

єю вагою повністю спираються на кріплення підготовчої виробки, що призводить до її деформування. Основний резерв підвищення стійкості підготовчих виробок полягає в управлінні часом і місцем руйнування основної покрівлі на межі з виробленим простором, для забезпечення її зависань. Запропоновано спосіб охорони підготовчих виробок, заснований на примусовому не вибуховому обваленні породної консолі, і показана його ефективність.

Ключові слова: гірнича виробка, напруги, деформації, руйнування, обвалення, покрівля.

Abstract. Ensuring of stability for the preparatory roadway in zone under the impact of winning operations is one of the main problems arising for the coal mines. Purpose of the research presented in this paper is to study changes in the rock stress-strain state around the preparatory roadway when the roadway enters a zone of supports behind the longwall and, basing on the findings, to create a method for preparatory roadway supporting behind the longwall.

The study was conducted by a finite element method. The simulation shows that with the rigid protective constructions erected after the failure of immediate roof, there are two characteristic zones with utmost maximum principal stress in the main roof, which, from the side of the seam, exceed 5 times the tensile strength. It means that the most probable failure of the main roof could happen from the side of the seams, and after this the broken-down rocks by their full weights would lean on and deform supports of the preparatory roadway. The main reserve providing the roadway stability is to control time and place of the main roof failure on the border with the goaf to ensure the roof hanging. A method is proposed for the roadway protection which is based on the forced non-explosive failure of the rock cantilever, and the method effectiveness is demonstrated.

Keywords: roadway, stresses, deformation, fracture, failure, roof.

Статья поступила в редакцию 14.06.2013

Рекомендована к печати д-ром техн. наук В.Г. Шевченко