

© В.В. Фомичев¹, В.А. Соцков¹, А.А. Запорожец¹, И.В. Назаров¹

¹ Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОРОДНОМ МАССИВЕ, ВКЛЮЧАЮЩЕМ СОПРЯЖЕНИЕ ВЫЕМОЧНОЙ И ОЧИСТНОЙ ВЫРАБОТОК ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАКЛАДКИ

© V. Fomychov¹, V. Sotskov¹, A. Zaporozhets¹, I. Nazarov¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

ANALYSIS OF THE STRESS DISTRIBUTION CHANGES IN THE ROCK MASS INCLUDING COUPLING OF EXTRACTIVE AND DEVELOPMENT WORKINGS WHILE VARIATING THE GEOMETRIC LAYING PARAMETERS

Цель. Целью является определение степени и качества влияния геометрических и механических параметров закладки выработанного пространства очистной выработки на состояние вмещающего мелкослоистого породного массива в области сопряжения выемочной и очистной выработки при условии отсутствия нарушения целостности породных слоев магистральными трещинами.

Методика. Вычислительный эксперимент заключался в проведении расчетов трех вариантов закладки выработанного пространства очистной выработки, пройденной в мелкослоистом породном массиве. Моделирование объектов исследования выполнено в трехмерном представлении с реализацией условий взаимного проскальзывания породных слоев. Механические характеристики элементов исследуемой геомеханической системы задавались с учетом результатов предварительного лабораторного и натурного экспериментов, определяющих механизм поведения сыпучей среды закладки выработанного пространства. Корреляционный анализ полученных деформаций геомеханической системы позволил определить зависимость степень взаимного влияния выбранной технологии охраны очистной выработки и механических характеристик породного массива.

Результаты. Полученные результаты расчетов вычислительного эксперимента позволили определить характер изменения нагрузки на крепь выемочной и очистной выработок при различных условиях закладки выработанного пространства. Анализ поля напряжений породного массива в совокупности с деформациями кровли очистной выработки показали физическую сущность развития процессов разрушения породных слоев при изменении геометрических и механических характеристик закладки. Анализ полученных деформаций породных слоев позволили определить условия формирования зон разупрочнения и условия формирования магистральных трещин для конкретной комбинации горно-геологических характеристик.

Научная новизна. Использование для определения эффективности выбранной схемы крепления комплексного многокритериального подхода, основанного на замерах перемещений контура выработки и внутренних усилий элементов крепления позволяет оценить адекватность выбранной вычислительной схемы при прогнозировании изменения состояния геомеханической системы, что однозначно является новой методикой, оценивающей эффективность принятых технологических решений на этапе проектирования подземных сооружений.

Практическая значимость. Полученные результаты позволяют обеспечить минимальный уровень деформирования кровли очистной выработки, позволяют оптимизировать логистику очистного участка за счет определения оптимальных объемов извлекаемой породы, снижают травматизм и улучшают условия работы горнорабочих очистного участка. Равномерное распределение нагрузки на крепь в пространстве и времени позволяет минимизировать износ гидравлической системы и как результат повысить энергоэффективность добычи угля

Ключевые слова. *закладка, породный слой, выработка, напряженно-деформированное состояние, бутовая полоса, пресекаемые породы.*

Актуальность. Горно-геологические условия эксплуатации выемочных выработок на шахтах Украины требуют реализации сложных технологических решений, обеспечивающих возможность добычи полезных ископаемых [1 - 3]. Свойства горного массива и механические характеристики слагающих его пород формируют условия, при которых деформация контура выработки может составлять до 90 % его исходных линейных размеров. Природа таких явлений такова, что даже значительное усиление крепи выработок не обеспечивает снижения конвергенции пород. При исследовании особенностей деформирования геомеханических систем выемочных выработок было выявлено два доминирующих варианта развития деформаций в горном массиве ориентированных либо близко к вертикальной оси, либо – горизонтальной [1, 4]. Очевидно, что основными факторами, определяющими направление доминирующих деформаций, является неоднородность механических характеристик пород, но это в случае с выработками, пройденными в нетронutom горном массиве. При взаимном влиянии выработок условия формирования деформационного поля геомеханической системы изменяются, что приводит к необходимости выполнять дополнительные охранные мероприятия. В этом смысле оставленные на добычном участке пресекаемые породы при селективной выемке угля могут быть использованы для возведения охранных конструкций, обеспечивающих удовлетворительный режим деформирования геомеханической системы сопряжения очистной и выемочной выработок.

Постановка задачи. При подвигании очистного забоя, в выработанном пространстве необратимо происходит сближение боковых пород и постепенное сжатие и уплотнение закладочного материала до установившейся плотности (плотности породы в целике). Поэтому для описания реальной картины поведения горного массива, в геомеханическую модель необходимо включить соответствующие механические характеристики закладочного материала, которые выражают его состояние под действием сжимающего нагружения.

Моделируемый закладочный материал состоит из разрушенной породы, получаемой при селективной выемке. Проведенные исследования [5] процессов селективной выемки показывают, что после разрушения пресекаемых пород шнековым исполнительным органом образуется до 55% пород с крупностью более 25 мм и не превышающих 120 мм.

Процесс сжатия закладочного материала можно разделить на две стадии – начального и конечного уплотнения. В период первой стадии происходит запол-

нение пустот между частицами материала при вертикальных сжимающих напряжениях до $\sigma_z = 2,0$ МПа, которые соответствуют относительной деформации $\varepsilon = 0,18$. Во второй (завершающей) стадии деформация увеличивается экспоненциально по мере увеличения напряжения. Частицы материала разрушаются на более мелкие и перераспределяются более компактно, увеличивая жесткость закладочного массива. При $\sigma_z = 8,0$ МПа, т.е. на глубинах 160 – 320 м относительная деформация ε закладочного массива составит 0,26.

Исходя из анализа деформационных свойств закладочного массива приняты следующие ее механические характеристики, которые соответствуют периоду сжимающего нагружения. Так, деформационные свойства породной полосы в период первой стадии (начального уплотнения) приняты следующими: модуль упругости $E_I = 11$ МПа, коэффициент поперечной деформации $\mu_I = 0,4$. В период второй стадии, которые соответствуют деформационным свойствам закладочного материала после усадки $E_I = 30$ МПа и $\mu_I = 0,3$.

Анализ состояния геомеханической системы сопряжения очистной и выемочной выработок при различных параметрах закладки. При анализе эпюр распределения интенсивности напряжений в породном массиве определим зоны максимальных главных напряжений, что позволит сформировать оптимальные условия обеспечения предельного равновесия свода очистной выработки после проведения работ по закладке выработанного пространства. Рассмотрим эпюры интенсивности напряжений в плоскости параллельной плоскости (груди) очистного забоя, располагающегося на расстоянии 10 м в сторону выработанного пространства для условий бутовых полос (см. рис. 1) и сплошной закладки (см. рис. 2, а).

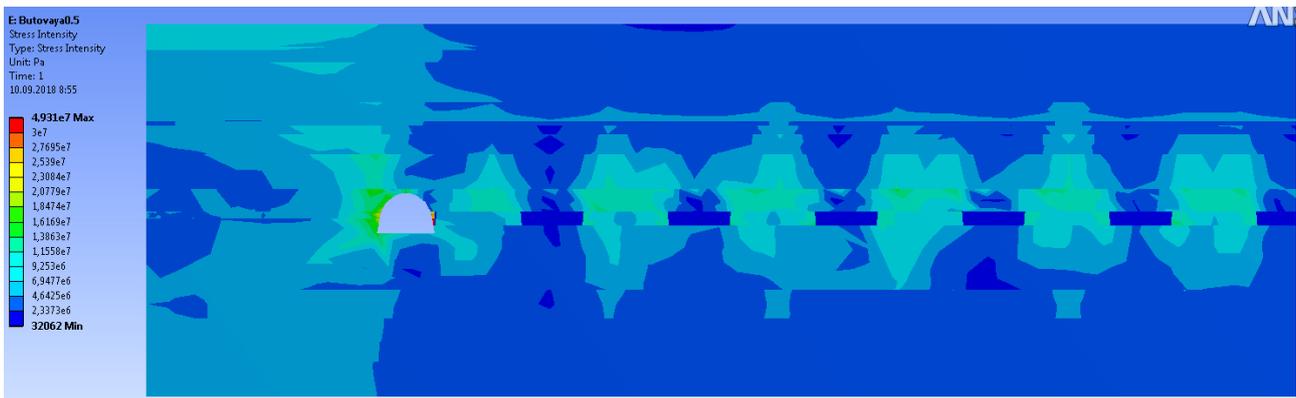


Рис. 1. Интенсивность деформаций породного массива перед плоскостью очистного забоя при закладке бутовыми полосами для высоты пресекаемых пород 0,5 м

Основной отличительной особенностью эпюр для вариантов закладки бутовыми полосами является концентрация напряжений в первом породном слое непосредственной кровли очистной выработки над бутовыми полосами. Изменение ширины бутовых полос значительно влияет на величину зон повышенных главных напряжений в кровли выработки и не оказывает существенного влияния

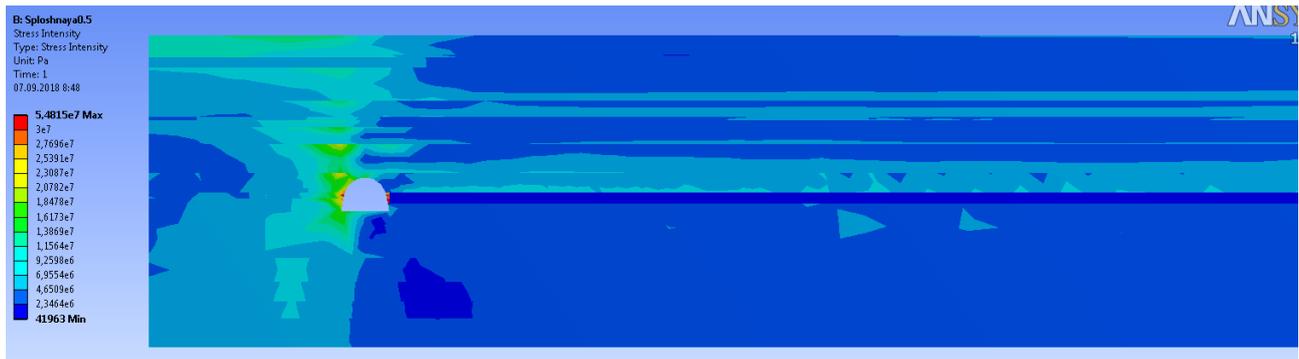
на почву очистной выработки и состояние породного массива вокруг выемочной выработки.

Величины максимальных напряжений уменьшаются по линейному закону от варианта высоты пресекаемых пород 0,5 м к высоте - 0,7 м. Это указывает на существование масштабного эффекта при распределении нагрузки на охранные конструкции вдоль очистного забоя. То есть, изменение картины распределения напряжений практически не зависит от места расположения бутовой полосы в очистной выработке. Таким образом, получаем конструктивную жесткость закладки, которая обеспечивает равномерное распределение внутренних усилий в кровле выработки по всей длине очистного забоя. Это позволяет купировать касательные напряжения, что значительно снижает влияние длины очистного забоя на процесс деформирования кровли и почвы выработки.

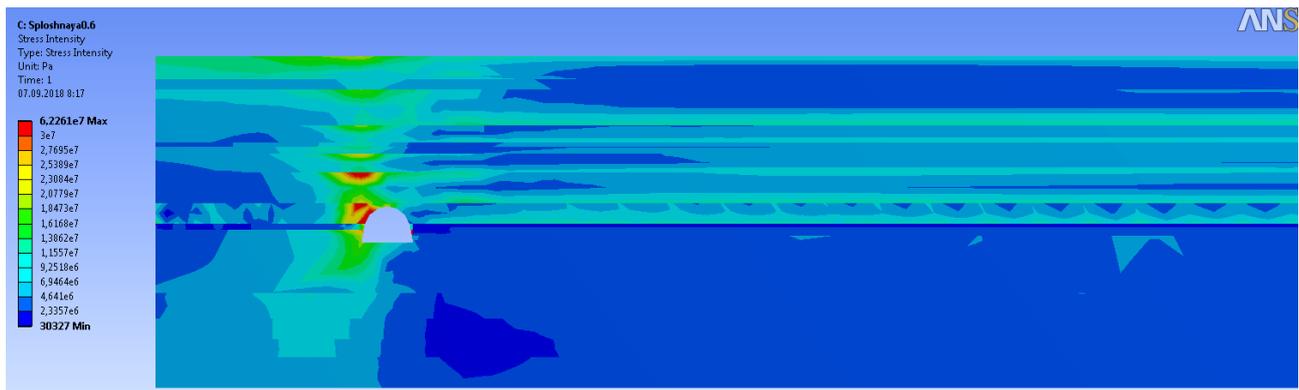
С увеличением ширины бутовых полос величина концентрации напряжений снижается и для варианта высоты пресекаемых пород 0,7 м весь первый породный слой и бутовые полосы испытывают близкие по значениям напряжения. То есть, кровля выработки и бутовые полосы сопротивляются деформированию согласовано, что препятствует возникновению магистральных трещин вплоть до развития деформирования породного массива под воздействие реологии [6- 9].

При сплошной закладке (см. рис. 2) вокруг выемочной выработки со стороны нетронутого породного массива наблюдается максимальная концентрация интенсивности напряжений. Если для варианта высоты пресекаемых пород 0,5 м (см рис. 2, а) концентрации напряжений соизмеримы с величинами полученными для закладки бутовыми полосами очистной выработки, то для большей высоты (см. рис. 2, б и в) максимум интенсивности напряжений возрастает на 30 – 36 %. С ростом высоты пресекаемых пород так же увеличивается число породных слоев с высокой интенсивностью напряжений. При этом влияние выемочной выработки, на распределение напряжений, распространяется 34 м вдоль плоскости очистного забоя.

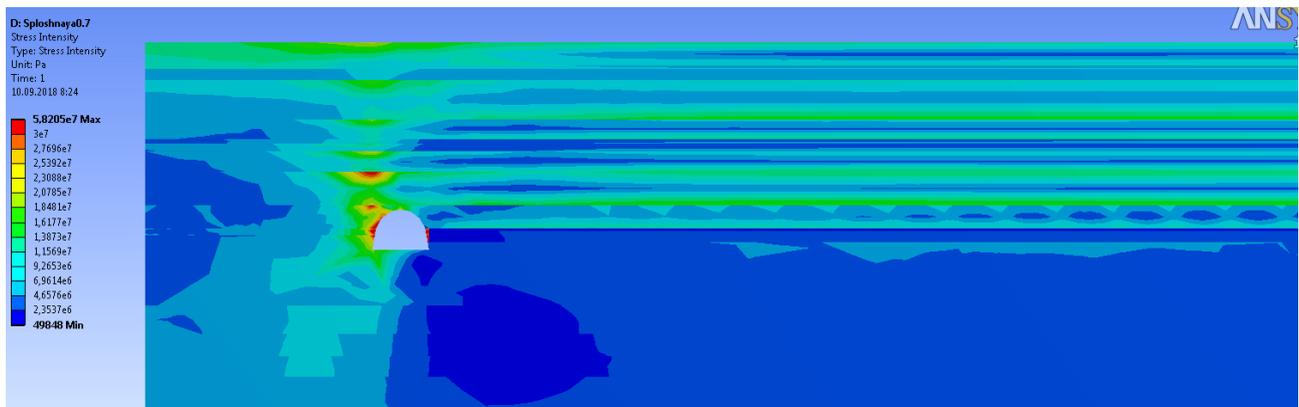
В отличие от закладки бутовыми полосами максимумы интенсивности напряжений в кровле очистной выработки растут с увеличением высоты пресекаемых пород. Рост происходит по нелинейному закону с ниспадающим градиентом. Это указывает на то, что при сплошной закладке высота пресекаемых пород является основным параметром, определяющим состояние кровли выработки в условиях статического равновесия расчетной модели. При этом, сравнивая распределение напряжений для сплошной закладки (рис. 2, а) и при использовании бутовых полос (рис. 1) в очистной выработке получаем, что эффективность второго технологического решения ниже первого, в выбранных горно-геологических условиях, и провоцирует «быстрое» разрушение кровли выработки. А это ухудшает условия функционирования механизированной крепи в очистном забое по всей его длине.



а)



б)



в)

Рис. 2. Интенсивность деформаций породного массива перед плоскостью очистного забоя при сплошной закладке для высоты пресекаемых пород: а) 0,5 м; б) 0,6 м; в) 0,7 м

Проведем анализ распределения интенсивности напряжений в первом породном слое кровли очистной выработки. Это необходимо для определения условий устойчивого состояния свободных боков бутовых полос, поскольку потеря их геометрической целостности приводит к изменению условий равновесия непосредственной кровли очистной выработки.

На рис. 3 приведены графики изменения интенсивности напряжений в срединной плоскости первого породного слоя кровли очистной выработки на расстоянии 12 м от плоскости очистного забоя. Выбор данной плоскости для проведения

анализа определен характеристиками поля интенсивности напряжений в кровле очистной выработки. При сохранении сплошности первого породного слоя напряжения в данной расчетной области в малой степени зависят от состояния нетронутого породного массива и состояния модели механизированной крепи. Относительная длина в точке 1 соответствует половине длины очистного забоя, а в точке 0 – плоскости сопряжения выемочной и очистной выработок.

Сравнительный анализ кривых представленных на рис. 3 показал, что с увеличением высоты пресекаемых пород максимальные значения интенсивности напряжений и диапазон их колебаний уменьшаются. Однако, если пики интенсивности напряжений на графике б) (см. рис. 3) имеют одинаковую величину вдоль всего очистного забоя, то на графике а) – пики к центру уменьшаются, на графике в) – растут. Это указывает на изменение природы нагружения секций механизированной крепи в зависимости от шириты бутовой полосы.

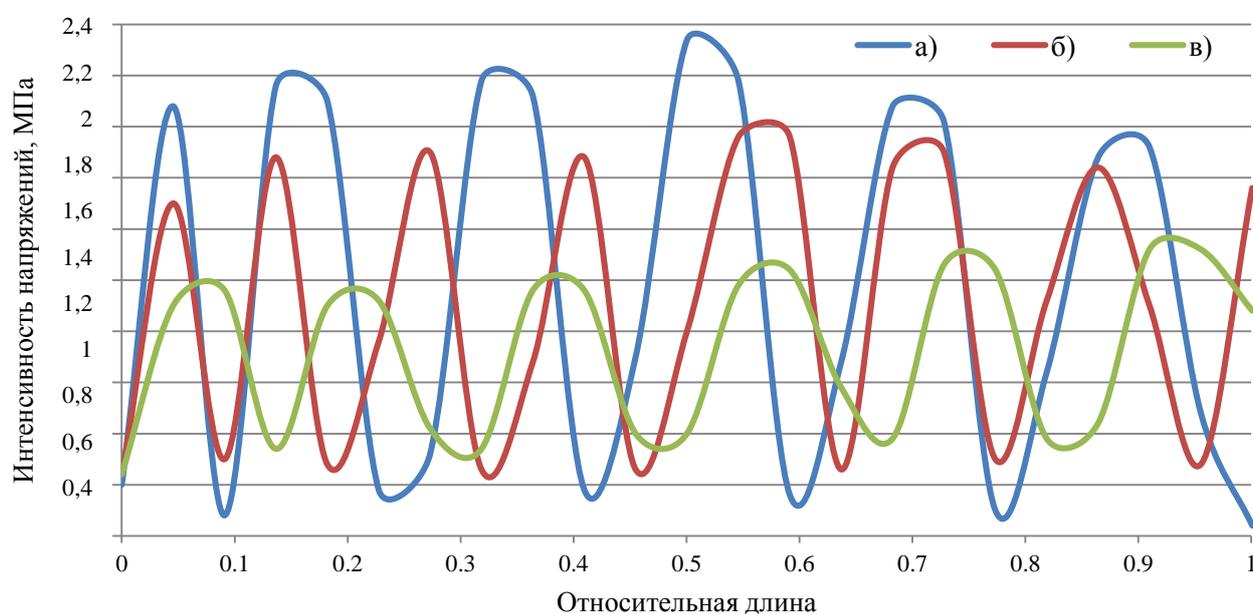


Рис. 3. Изменение интенсивности напряжений в первом породном слое кровли очистной выработки при закладке бутовыми полосами для высоты пресекаемых пород: а) 0,5 м; б) 0,6 м; в) 0,7 м

Данная величина в рассматриваемой технологии так же определяет геометрические параметры свободного выработанного пространства очистной выработки. То есть, влияет на характеристики давления воспринимаемого боками бутовых полос при закладке выработанного пространства. Бок бутовой полосы при условии динамического равновесия системы находится в неустойчивом равновесии, параметры которого естественным образом зависят от высоты бутовой полосы и величины расстояния между соседними бутовыми полосами. Изменение состояния первого породного слоя кровли вызвано тем, что с ростом высоты пресекаемых пород расстояние между бутовыми полосами сокращается, что и приводит к изменению характера распределения интенсивности напряжений.

Для того чтобы охарактеризовать состояние устойчивости боковых бутовых полос введем корреляционные коэффициенты K_{max} и K_{min} которые позволяют оценить степень колебаний максимумов интенсивности напряжений, соответственно над бутовой полосой и над свободным выработанным пространством очистной выработки.

Таким образом, на основании графиков изменения величины интенсивности напряжений (рис. 3) и в соответствии с выполненным выше анализом состояния геомеханической системы очистной выработки получим условие удовлетворительного состояния боков бутовых полос в виде

$$\left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{\sigma_{max}} \times \frac{h}{b} - \frac{K_{max}}{K_{min}} \right| < 4,08, \quad (1)$$

где: σ_{max} и σ_{min} – максимум и минимум колебаний интенсивности напряжений по длине очистного забоя; h – ширина бутовой полосы принятая при проектировании; b – высота пресекаемых пород.

Анализ развития деформаций породного массива при различных способах закладки выработанного пространства. Учитывая параметры расчетов вычислительного эксперимента картину распределения деформаций в породном массиве можно анализировать только с позиции качественной оценки при условии сохранения сплошности всех элементов расчетной модели, что естественным образом исключает возможность возникновения значительных деформаций породного массива направленных вдоль плоскости напластования.

На рис. 4 и рис. 5 представлены фрагменты трехмерной расчетной модели геомеханической системы сопряжения выемочной и очистной выработки при использовании бутовых полос и сплошной закладке выработанного пространства, соответственно.

Полученные отображения распределения полных деформаций в породном массиве показывают, что характер опускания кровли очистной выработки не зависит от выбора способа ее закладки, но величины деформаций породных слоев кровли при сплошной закладке (см рис. 5) на 19 % больше. Это указывает на уменьшение потенциальной энергии деформации при сплошной закладке, вызванной пониженной конструктивной прочностью бута при сплошной закладке относительно условий формирования бутовых полос при закладке бутовыми полосами.

Распределение полных деформаций при высоте пресекаемых пород 0,5 м и 0,6 м имеет схожий вид, что указывает на отсутствие влияния вариантов закладки на процессы деформирования пород кровли очистной выработки в допредельном состоянии. Характер деформирования нетронутого породного массива совпадает качественно и количественно. Следовательно, при проведении вычислительного эксперимента выбранные параметры механизированной крепи обеспечивают одинаково эффективное сопротивление деформированию окружающего породного массива при различных условиях закладки очистной выработки.

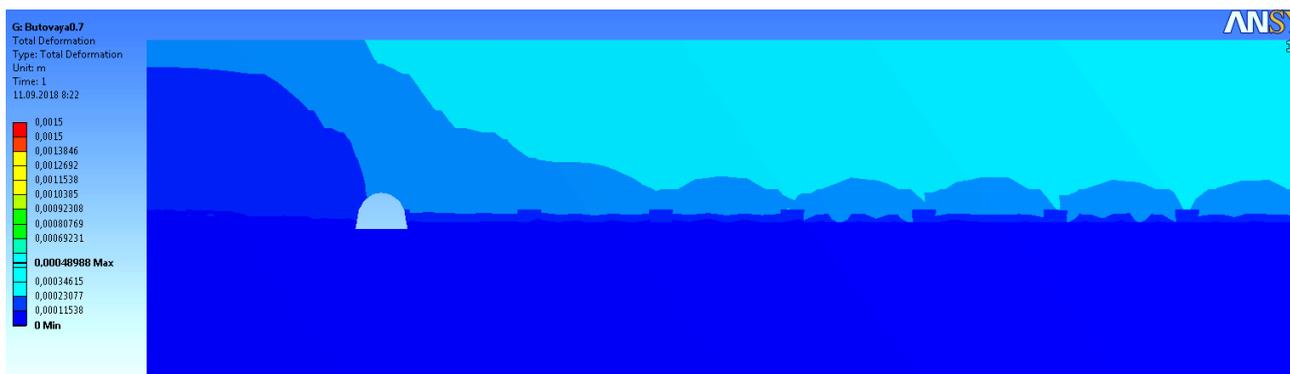


Рис. 4. Полные деформации породного массива перед плоскостью очистного забоя при закладке бутовыми полосами для высоты пресекаемых пород 0,7 м

На боковых поверхностях параллелепипедов распределение деформаций имеет различный характер, обусловленный выбором бутовых полос или сплошной закладки. Здесь выделим две особых области деформирования породных слоев кровли очистной выработки: первая – верхние породные слои модели; вторая – два породных слоя, примыкающих сверху непосредственного к угольному пласту. Поведение породного массива в кровле очистной выработки при полной закладке имеет более сложную структуру в первой области деформирования, а при закладке бутовыми полосами во второй области. Соответственно, определим два различных подхода в анализе картины деформаций в данных зонах – обобщенный анализ в выбранной вертикальной плоскости и сравнение деформирования отдельного породного слоя вдоль очистного забоя.

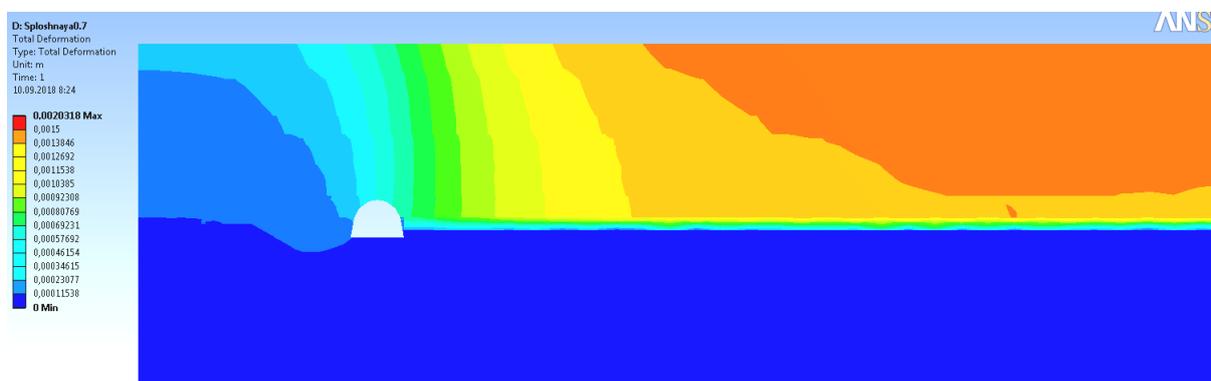


Рис. 5. Полные деформации породного массива перед плоскостью очистного забоя при сплошной закладке для высоты пресекаемых пород 0,7 м.

На рис. 5 распределение деформаций представлено в плоскости выбранной при рассмотрении картины напряжений, представленной на рис. 4. Из представленных эпюр видно, что с увеличением высоты пресекаемых пород величина деформирования породных слоев кровли очистной выработки уменьшается по закону близкому к линейному. Деформация породного массива вблизи выемочной выработки для результатов расчетов выполненных для частичной закладки имеет одинаковую величину и картину. Однако для расчета с высотой пресекаемых пород 0,7 м величина деформаций вблизи выемочной выработки снижается

на 18 %. Это сопровождается уменьшением деформаций в первом породном слое непосредственной кровли выемочной выработки.

Периодическая сводообразная картина деформации породных слоев непосредственной кровли четко соответствует условиям расположения бутовых полос в выработанном пространстве выемочной выработки. Верхние точки сводов располагаются над продольной осью бутовых полос, а «опорная часть» приходится на середину свободного пространства. Высота рассматриваемых сводов захватывает два слоя непосредственной кровли очистной выработки. То есть, влияние геометрии бутовых полос на деформацию пород кровли очистной выработки не распространяется дальше второго породного слоя и в абсолютных величинах не превышает две высоты выемочной выработки (менее 17 м).

Таким образом, за счет различной картины распределения деформаций в породных слоях кровли выработки провоцируется разрыв сплошности породного массива вдоль плоскости напластования. Это приводит к формированию локальной области с малой поперечной прочностью в пределах первого и второго породных слоев. При этом породные слои, расположенные выше формируют блок, равномерно опускающийся в очистную выработку. В реальных условиях происходит частичное обрушение непосредственной кровли очистной выработки с переходом в следующее состояние устойчивого равновесия. Из результатов расчетов видно, что чем величина таких разрушений, тем быстрее наступает второй этап посадки непосредственной кровли очистной выработки при закладке бутовыми полосами.

Для эпюр деформаций характерно сохранение качества распределения деформаций в кровле очистной выработки не зависимо от высоты пресекаемых пород. Однако, для варианта расчета с высотой пресекаемых пород 0,5 м имеем снижение абсолютных значений деформаций в породном массиве кровли очистной выработки на 22 % относительно расчетов для 0,6 и 0,7 м. Это, указывает на то, что увеличение высоты пресекаемых пород при сплошной закладке очистной выработки негативно сказывается на несущей способности охранных конструкции и для пород, обладающих низкими прочностными характеристиками выбор величины этого параметра является критически важным.

В отличии от результатов расчетов для закладки бутовыми полосами (см. рис. 4) при сплошной закладке изменение высоты пресекаемых пород приводит к увеличению деформаций породного массива вокруг выемочной выработки. Если при высоте пресекаемых пород 0,5 м деформации кровли выработки соизмеримы для бутовых полос и сплошной закладки, то для 0,6 и 0,7 м эти деформации увеличиваются на 12 - 15 %. Следовательно, крепь выемочной выработки воспринимает возросшее боковое давление, что ухудшает ее эксплуатационные характеристики [10,11].

В боку выемочной выработки со стороны очистной выработки наблюдается область градиента деформаций. Ширина данной области увеличивается по степенному закону с увеличением высоты пресекаемых пород. Максимально эти изменения отображаются во втором породном слое непосредственной кровли очистной выработки. Рост размеров области градиента деформаций достигает 370 % со смещением к срединной плоскости очистного забоя. Это указывает на возмож-

ность формирования многоуровневой блочной системы разрушения слоистого породного массива кровли очистной выработки [10]. При этом высота и ширина блоков определяется комбинацией высоты породных слоев кровли очистной выработки и абсолютной величиной градиента полных деформаций [7, 11].

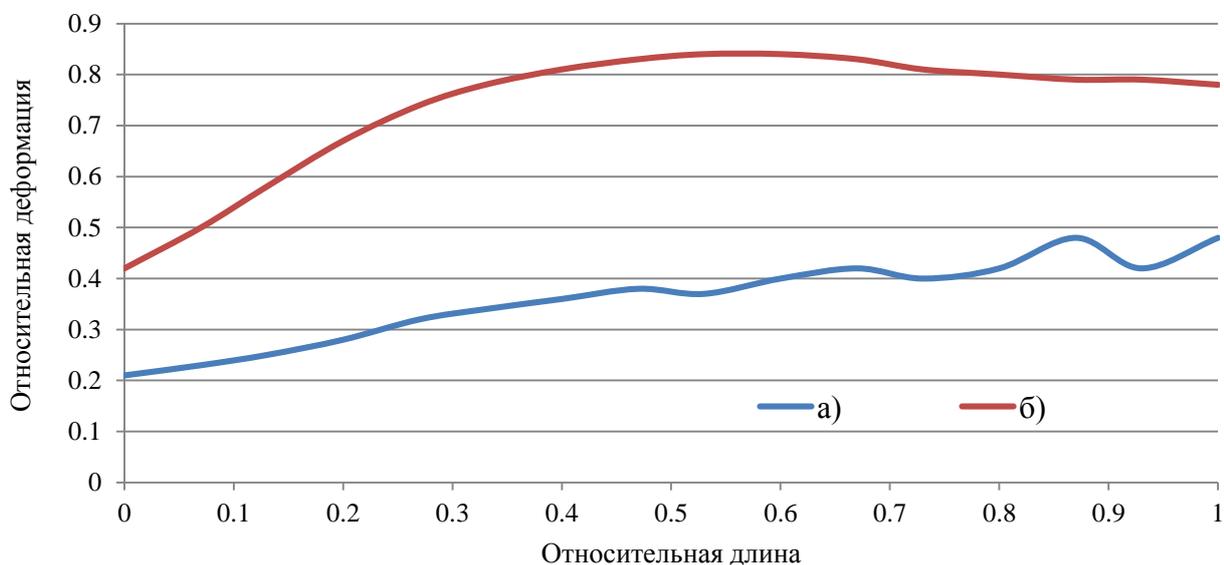


Рис. 6. Графики изменения относительных деформаций поперек очистной выработки во втором породном слое при высоте пресекаемых пород 0,6 м для вариантов закладки: а) бутовых полос; б) сплошной

Проанализируем развитие деформаций породного массива в кровле очистной выработки на основе графиков, изображенных на рис. 6 изменения деформаций для бутовых полос (а) и сплошной (б) закладки.

График распределения деформации во втором породном слое кровли при сплошной закладке демонстрирует последовательный рост со стабилизацией величины в средней части очистной выработки. Увеличение деформации не превышает 48 % относительно плоскости сопряжения выемочной и очистной выработок. В районе четверти длины очистного забоя возникает точка перегиба определяющая область вероятного трещинообразования вдоль оси очистной выработки. То есть, потенциальная энергия деформации при сплошной закладке концентрируется в двух областях породного массива, что провоцирует рост деформаций во всей кровле очистной выработки.

Периодические изменения в графике деформаций при закладке бутовыми полосами иллюстрируют основную особенность данной технологии. Фактически для каждой бутовой полосы формируются условия НДС характерные при сплошной закладке для всей длины очистного забоя. График формируется на основе суперпозиции развития деформации по всей длине очистной выработки и совокупности зон влияния бутовых полос. За счет этого снижается абсолютное значение полных деформаций и уменьшается концентрация потенциальной энергии в точках перегиба графика деформации. При этом рост деформации по длине очистного забоя составляет 57 %.

В итоге, при сравнении изменения полной деформации при использовании бутовых полос и сплошной закладке очистной выработки получаем, что в первом варианте диссипация энергии деформации породных слоев выше в среднем на 11 %. Это при оптимальном выборе ширины свободного пространства между бутовыми полосами позволяет добиться плавного опускания непосредственной кровли очистной выработки без возникновения не управляемых динамических процессов.

Работа выполнена в рамках научной тематики ГП-497 (0117U006753) «Ресурсосберегающая геотехнологические и гидродинамическая параметризация добычи маломощных запасов минерального сырья в техногенно-нагруженной среде», которая финансируется за счет государственного бюджета Украины.

Выводы.

1. Воздействие очистных работ, проводимых с использованием бутовых полос, на напряженно-деформированное состояние породного массива в своде и нетронутым боку выемочной выработки является минимальным. Это положительно влияет на параметры устойчивости геомеханической системы в целом и позволяет сформировать практический базис для обоснования параметров оптимальной крепежной системы выработок в дальнейшем.

2. При использовании бутовых полос процесс трещинообразования в непосредственной кровле очистной выработки купируется путем локализации областей и величин напряжений, способствующих росту магистральных трещин

3. Оптимальным с точки зрения динамической устойчивости непосредственной кровли очистной выработки и бутовых полос является выбор минимально допустимой высоты пресекаемых пород при обеспечении статистического равновесия боков бутовых полос. В рассмотренных условиях оптимальной высотой пресекаемых пород является 0,6 м.

Перечень ссылок

1. Fomychov V., Pochepov V., Fomychova L., & Lapko V. (2017). Computational model for evaluating the state of geomechanical systems during computing experiments. *Mining of Mineral Deposits*. Vol. 11 (1), 100-105.
<https://doi.org/10.15407/mining11.01.100>
2. Sotskov, V., Russkikh, V., Astafiev, D. (2015). Research of drainage drift during overworking of adjacent coal seam C5 under conditions of “Samarska” mine. *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 221-226.
<https://doi.org/10.15407/mining11.01.100>
3. Fomichov, V., Sotskov, V., & Malykhin, A. (2014) Determination and analysis of the acceptable benchmark changes of the stress strain state of frame and bolt fastening elements of dismantling drift when approaching a working face. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu* (1):22-26.
4. Fomichov V., Sotskov V., Pochepov V. & Mamaikin O. (2018). Formation of a calculation model determining optimal rate of stoping face movement with a large deformation of a rock massif. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(7), 2381-2389.
5. Sotskov, V., & Gusev, O. (2014). Features of using numerical experiment to analyze the stability of development workings. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 401-404
<https://doi.org/10.1201/b17547-68>

6. Cheberiachko, S., Cheberiachko, Yu., Sotskov, V., & Tytov, O. (2018). Analysis of the factors influencing the level of professional health and the biological age of miners during underground mining of coal seams. *Mining of Mineral Deposits*, 3 (12), 87-96.
<https://doi.org/10.15407/mining12.03.087>
7. Sotskov V., Podvyhina O., Dereviahina N. & Malashkevych D. (2018). Substantiating the criteria for applying selective excavation of coal deposits in the Western Donbass. *Dniprop. Univer. bulletin, Geology, geography.*, 26(1), 158-164.
8. Fomychov V. & Sotskov V. (2018). Determination of parameters of non-uniform fractured rock massif in computing experiment. *Dniprop. Univer. bulletin, Geology, geography.*, 26(1), 26-32.
<https://doi.org/10.15421/111803>
9. Bondarenko V., Kovalevska I., Symanovych G., Sotskov V. & Barabash M. (2018). Geomechanics of interference between the operation modes of mine working support elements at their loading. *Mining Science* Vol. 25, 219–235.
10. Mamaikin O., Demchenko Yu., Sotskov V. & Prykhorchuk O. (2018). Productive flows control in coal mines under the condition of diversification of production. *Ukrainian School of Mining Engineering*, Vol. 60
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000008>
11. Inkin O., Tishkov V., Dereviahina N. & Sotskov V. (2018). Integrated analysis of geofiltrational parameters in the context of underground coal gasification relying upon calculations and modeling. *Ukrainian School of Mining Engineering*, Vol. 60.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000035>

АНОТАЦІЯ

Мета. Метою є визначення ступеня і якості впливу геометричних і механічних параметрів закладки виробленого простору очисної виробки на стан, що вміщує дрібношаруватий породний масив в області сполучення виїмкової і очисної виробки за умови відсутності порушення цілісності породних шарів магістральними тріщинами.

Методика. Обчислювальний експеримент полягав у проведенні розрахунків трьох варіантів закладки виробленого простору очисної виробки пройденої в дрібношаруватому породному масиві. Моделювання об'єктів дослідження виконано в тривимірному поданні з реалізацією умов взаємного проковзування породних шарів. Механічні характеристики елементів досліджуваної геомеханічної системи задавалися з урахуванням результатів попереднього лабораторного та натурного експериментів визначають механізм поведінки сипучого середовища закладки виробленого простору. Кореляційний аналіз отриманих деформацій геомеханічної системи дозволив визначити залежність ступеню взаємного впливу обраної технології охорони очисної виробки і механічних характеристик породного масиву.

Результати. Отримані результати розрахунків обчислювального експерименту дозволили визначити характер зміни навантаження на кріплення виїмкових і очисної виробок при різних умовах закладки виробленого простору. Аналіз поля напружень породного масиву в сукупності з деформаціями покрівлі очисної виробки показали фізичну сутність розвитку процесів руйнування породних шарів при зміні геометричних і механічних характеристик закладки. Аналіз отриманих деформацій породних шарів дозволили визначити умови формування зон знеміцнення і умови формування магістральних тріщин для конкретної комбінації гірничо-геологічних характеристик.

Наукова новизна. Використання для визначення ефективності обраної схеми кріплення комплексного багатокритеріального підходу заснованого на вимірах переміщень контуру виробки і внутрішніх зусиль елементів кріплення дозволяє оцінити адекватність обраної обчислювальної схеми при прогнозуванні зміни стану геомеханічної системи, що однозначно є новою методикою, яка оцінює ефективність прийнятих технологічних рішень на етапі проектування підземних споруд.

Практична значимість. Отримані результати дозволяють забезпечити мінімальний рівень деформування покрівлі очисної виробки, дозволяють оптимізувати логістику очисної ділянки за рахунок визначення оптимальних обсягів породи, що виймаються, знижують травматизм і покращують умови роботи гірників очисної ділянки. Рівномірний розподіл навантаження на кріплення в просторі і часі дозволяє мінімізувати зношення гідравлічної системи і як результат підвищити енергоефективність видобку вугілля.

Ключові слова. закладка, породний шар, виробка, напружено-деформований стан, бутова смуга, присічні породи.

ABSTRACT

Purpose. The goal is to determine the degree and quality of influence of the geometric and mechanical parameters of the laying of the excavated space of the mine workings on the state of the enclosing fine-layered rock mass in the interface area of the excavation and development mine workings provided there is no violation of the integrity of the rock layers by main cracks.

The technique. The computational experiment consisted in calculating three options for laying the worked-out space of a cleaning development that was passed in a small-layer rock mass. The modeling of the objects of study was carried out in a three-dimensional representation with the realization of the conditions for the mutual slippage of the rock layers. The mechanical characteristics of the elements of the geomechanical system under study were set taking into account the results of preliminary laboratory and field experiments, which determine the mechanism of the behavior of the granular medium of the formation of the developed space. The correlation analysis of the obtained deformations of the geomechanical system made it possible to determine the dependence of the degree of mutual influence of the selected technology for protecting the treatment output and the mechanical characteristics of the rock mass.

Results. The results of calculations of the computational experiment made it possible to determine the nature of the change in the load on the lining of the excavation and cleaning workings under various conditions for laying out the developed space. An analysis of the stress field of the rock massif together with the deformations of the roof of the clearing generation showed the physical essence of the development of the processes of destruction of the rock layers when the geometrical and mechanical characteristics of the bookmark change. The analysis of the deformations of the rock layers made it possible to determine the conditions for the formation of softening zones and the conditions for the formation of main cracks for a particular combination of geological characteristics.

Scientific novelty. Use to determine the effectiveness of the chosen mounting scheme of an integrated multi-criteria approach based on measurements of contour movements and internal fastening elements allows to evaluate the adequacy of the selected computational scheme when predicting changes in the state of the geomechanical system, which is definitely a new technique that evaluates the effectiveness of technological solutions adopted at the stage of underground design constructions.

Practical significance. The results obtained ensure the minimum level of deformation of the roof of the clearing generation, optimize the logistics of the clearing site by determining the optimal volumes of recoverable rock, reduce injuries and improve the working conditions of the miners of the clearing site. The uniform distribution of the load on the lining in space and time allows minimizing the wear of the hydraulic system and, as a result, improves the energy efficiency of coal mining.

Keywords. laying, rock layer, mine working, stress-strain state, rubble strip, suppressed rocks.