

© В.В. Фомичев<sup>1</sup>, В.А. Соцков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный технический университет «Днепровская политехника», Днепр, Украина

## ПРОВЕДЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ СЕКЦИИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ КРЕПИ

© V. Fomychov<sup>1</sup>, V. Sotskov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## CONDUCTION AND ANALYSIS OF RESULTS OF COMPUTATIONAL EXPERIMENTS TO DETERMINE THE EFFECTIVENESS FUNCTIONING STRUCTURES SECTION POWERED SUPPORTS

**Цель.** Целью системного анализа состояния кровли очистной выработки и распределения нагрузки в конструктивных элементах механизированной крепи является определение системы выбора оптимальной конфигурации секции крепи очистного забоя основанной на прогнозе качественных показателей деформирования приконтурных породных слоев.

**Методика.** Вычислительный эксперимент проведен на основе трехмерного моделирования геомеханической системы очистной выработки пройденной с слоистом породном массиве методом конечных элементов с использованием нелинейных закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния исследуемого объекта.

**Результаты.** Разработанные расчетные модели геомеханической системы позволили определить картину деформации непосредственной кровли очистной выработки при различных схемах управления процессом ее опускания. Прогнозы деформирования и разрушения породных слоев, полученные при исследовании возможных структур изменения состояния породного массива, были использованы для организации расчетов геомеханической системы с различными конструкциями стоек механизированной крепи.

**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.** Разработанная методика определения оптимальных параметров конструкции секции механизированной крепи очистной выработки, позволяет комплексно сократить затраты на проведение ремонтно-восстановительных мероприятий и снизить энергозатраты связанные с обеспечением работоспособности очистного забоя в сложных горно-геологических условиях.

**Ключевые слова.** породный массив, очистная выработка, напряженно-деформированное состояние, секция крепи, механизированная крепь, эксперимент, закладка.

**Актуальность.** Эффективность работы различных конфигураций стоек механизированной крепи находится в прямой зависимости от горно-геологических и технологических условий конкретного добывающего участка. Например, для условий шахты «Самарская» [1, 2] механизированная крепь усиливалась рудничными стойками, которые обеспечивают поддержание непосредственной кровли очистного забоя в зоне работы очистного комбайна. Поэтому определение конструктивных характеристик механизированной крепи при реализации технологии закладки выработанного пространства было выполнено для двух вариантов – жесткого и податливого.

Анализ характера распределения нагрузок при отработке угольных пластов с закладкой выработанного пространства в сравнении с управлением кровлей полным обрушением показал, что существуют фундаментальные различия в процессе обрушения непосредственной кровли очистного забоя [3 – 6]. Изложенные представления о гипотезе и механизме деформаций породных слоев, окружающих очистную выработку, и взаимодействия пород кровли с крепью могут служить основанием для построения ряда теоретических расчетных схем, в которых следует учитывать как элементы кинематики процесса, так и механические характеристики описывающие неупругое состояние элементов геомеханической системы.

**Постановка задачи.** Для проведения сравнительного анализа эффективности применения различных конструктивных особенностей механизированной крепи была построена модель породного массива соответствующая реальным условиям эксплуатации. Строение и механические особенности вмещающего породного массива и угольного пласта выполнено на основании «Проекта выемочного участка 4205 лавы пл. С<sub>4</sub><sup>2</sup> бл. №3», рабочего проекта «Вскрытие и подготовка блоков №2 и №3 шахты «Самарская», выполненного институтом «Днепрогипрошахт», согласно требованиям «Правил безопасности в угольных шахтах НПАОП 10.0-1.01-10», «ПТЭ СОУ10.1-00185790-002-2005», «Руководства по управлению кровлей и креплению в очистном забое на угольных пластах с углом падения до 35°» КД.12.01.01.503-2001г.

4205 лава пл. С<sub>4</sub><sup>2</sup> оборудована выемочным комплексом КД-80 с комбайном КА-200 и конвейером СП-251.14. Длина лавы – 180 м. Схема проветривания лавы прямоточная 3-В-Н-г-пт.

Отработка 4205 лавы будет проводиться в блоке №3 шахтного поля по угольному пласту С<sub>4</sub><sup>2</sup>, с присечкой пород непосредственной почвы угольного пласта С<sub>4</sub><sup>2</sup>.

В зоне горных работ моделируемой при проведении исследований присутствуют особенности горно-геологических условий определяющие применение понижающих и компенсирующих поправочных коэффициентов при выполнении расчетов [4, 7].

При проведении подготовительных выработок были выявлены зоны неупругих деформаций величиной 10 – 12 м, в пределах которых породы обладают повышенной трещиноватостью и в пределах которых возможны обрушения пород кровли: О.З. № 1971 вдоль 4205 бортового штрека (в результате влияния вышележащего 543 бортового штрека), О.З. № 1997 вдоль 4205 разрезной печи, О.З. № 1998 вдоль 4205 сборного штрека (и в результате влияния вышележащего 543

сборного штрека), О.З. № 1992 от откаточного штрека бл. № 3 и конвейерного штрека бл. № 3 (ПК 43+9 - ПК 51+4 по 4205 бортовому штреку; ПК 41+2 - ПК 48+7 по 4205 сборному штреку); наличием сложной гипсометрии угольного пласта С<sub>4</sub><sup>2</sup>, при отработке возможна встреча мелкой складчатости вдоль забоя лавы; зонами ПГД № 840 (ПК181+6 - ПК189 по 4205 бортовому штреку; ПК 173+3м - ПК 180+5м по 4205 сборному штреку), № 848 (ПК124+7м - ПК 130+6м по 4205 сборному штреку); № 839 (ПК 50+7м - ПК 61м по 4205 бортовому штреку; ПК 50 - ПК 56 по 4205 сборному штреку), в пределах которых породы кровли характеризуются повышенной склонностью к обрушению; вывал пород кровли по 4205 сборному штреку на высоту h = 4 м - ПК 53+1 - ПК 53+7 (О.з. № 2006).

Таблица 1

Основные горнотехнические показатели выемочного участка

Наименование показателей	Значение показателей
Продолжительность отработки участка, мес.	10
Мощность пласта, м:	
- геологическая	0,66-0,83
- вынимаемая	1,03
Угол падения пласта, град:	
- вдоль лавы	1°
- по направлению отработки	1-5°
Длина лавы, м	180
Длина выемочного столба, м	1666
Система разработки	Столбовая бесцеликовая
Направление отработки лавы	По восстанию
Направление движения забоя	Обратный ход
Подвигание очистного забоя, м	
- цикл выемки	0,8
- в сутки	7,4
- за месяц	228,2

Прочностные характеристики пород понижены в соответствии с обводненностью лавы которая связана с наличием угольного пропластка, песчаника в основной и непосредственной кровли и покровными отложениями - прогнозируемый водоприток до 10 м<sup>3</sup>/ч (может достигать 25 м<sup>3</sup>/ч, что было зафиксировано при проведении откаточного штрека пл. С<sub>4</sub><sup>2</sup>).

Первичная посадка основной кровли ожидается через 20 - 30 м, дальнейшая посадка основной кровли через 20 - 35 м (по аналогии с 4203, 4201, 4204, 4202 лавами и выше отработанными лавами пл. С<sub>5</sub>, междупластье составляет 11,2 – 12,8 м).

**Первичный анализ состояния секций механизированной крепи.** При традиционной технологии, консоли из зависающих над лавой породных слоев

основной кровли, формируют область неустойчивых пород которая оказывает основную давление на крепь в очистной выработке. Распределение напряжений в секции механизированной крепи при традиционной технологии добычи угля представлено на рисунке 1. Избранная проекция трехмерной модели секции механизированной крепи позволяет проанализировать степень нагружения отдельных узлов крепи контактирующих с породным массивом.

Данная эпюра показывает, что давление, оказываемое на секцию крепи со стороны обрушенных пород, близко к предельному и соизмеримо с усилиями воспринимаемыми элементами гидравлической системы. При этом давление кровли и почвы очистного забоя в 1,8 – 2,1 раза меньше. Можно сделать вывод о том, что отсутствие достаточного уровня податливости элементов крепи со стороны выработанного пространства приводит к увеличению нагружения гидравлических цилиндров. Причем вектор нагрузки смещается относительно продольной оси цилиндра, что требует увеличения внутреннего давления гидравлической системы на 5 – 7 % в зависимости от скорости подвигания очистного забоя.

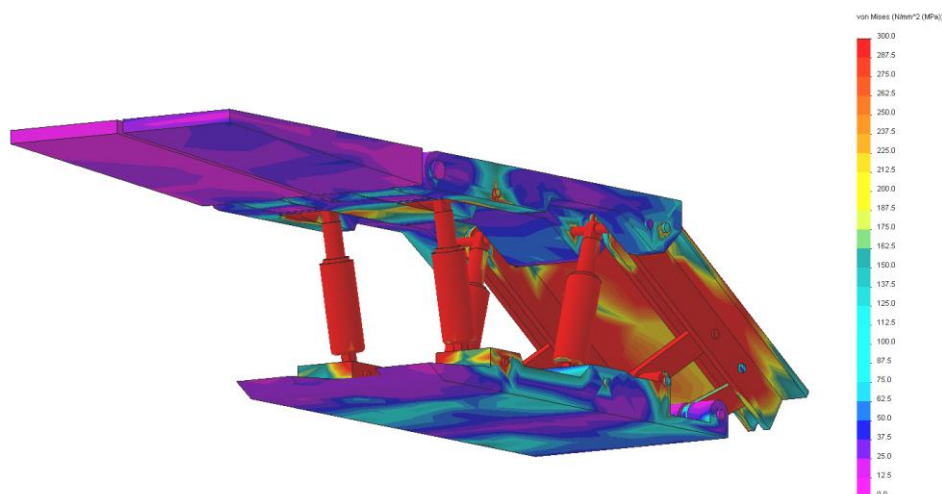


Рис. 1. Распределение напряжений по Мизесу в секции механизированной крепи при традиционной технологии с учетом давления обрушенных пород.

Таким образом, давление обрушенных пород со стороны выработанного пространства в данном конструктивном решении секции механизированной крепи оказывает наиболее негативное воздействие на состояние основных силовых элементов крепи, приводит к увеличению технологических издержек эксплуатации крепи и косвенно повышает аварийность оборудования в очистном забое. При селективной выемке угля частичная закладка выработанного пространства ограничивает опускание породных слоев основной кровли на высоту закладки и развитие расслоения кровли замедляется со стабилизацией сдвижения на пониженном расстоянии позади от лав; объем неустойчивых пород и нагрузка от их веса снижается. Это позволило реализовать конструкцию механизированной крепи с двумя гидропатронами поддерживающими обратную консоль секции крепи [8].

Размещение секции крепи в модели породного массива полностью отображает условия ее эксплуатации в реальных условиях, при которых за счет частичной закладки выработанного пространства отсутствует избыточное давление на обратную консоль крепи пород непосредственной кровли. В результате тело крепи нагружено равномерно с концентрацией внутренних усилий в зонах контакта отдельных конструктивных элементов. В целом уровень напряжений соответствует величинам, полученным для традиционной крепи (см. рис. 1), при этом все цилиндры гидравлической системы нагружены в 1,3 – 1,5 раза меньше. Данная модель крепи равномерно распределяет нагрузку кровли и почвы очистной выработки по направлению подвигания очистного забоя. Следовательно, режим функционирования для данного конструктивного варианта секции крепи в рассмотренных горно-геологических условиях является наиболее оптимальным, обеспечивающим минимальный износ агрегатов [9].

Однако, предложенная конструкция секции механизированной крепи не предусматривает возможность сопротивления обрушению зависающих пород кровли очистной выработки. В случае роста давления на обратную консоль крепи происходит срабатывание гидропатронов с последующим опусканием консоли. Локальная жесткость данной конструкции ниже остальных элементов секции крепи на 20 – 30 %. Это ставит вопрос об эффективности ее использования в горно-геологических условиях при которых вероятность обрушения непосредственной кровли очистной выработки при частичной закладке превышает 0,3. В результате была предложена конструкция секции механизированной крепи с усиленной опорной конструкцией обратной консоли.

**Анализ состояния нарушенного породного массива.** Выявленные нарушения сплошности и зоны разупрочнения пород были проанализированы на предмет взаимного влияния и интегрального воздействия на крепь очистной выработки. В результате была разработана трехмерная модель слоистого породного массива в которой максимально учитываются все особенности прочностных и деформационных характеристик пород и угольного пласта.

Эпюра распределения интенсивности напряжений в исследуемой структуре породного массива, представленная на рис. 2, позволяет определить узловые точки развития магистральных трещин образующих породные блоки. В этом процессе участвуют три породных слоя образующих непосредственную кровлю очистной выработки.

На первом этапе происходит продольное расслоение первого от угольного пласта породного блока. Это происходит за счет воздействия замкнутой зоны повышенных напряжений располагающейся в глубине породного массива 4 – 7 м от плоскости очистного забоя. На втором этапе, формирующиеся блоки первого слоя создают избыточное давление на нижнюю плоскость второго сверху породного слоя. За счет малой высоты этого слоя критическая концентрация энергии деформации формирует плоскость отрыва блока через интервалы 2,5 – 4,5 м, что в последующем формирует цепочку пластических шарниров обеспечивающих плавное опускание крупных породных блоков непосредственной кровли очистной выработки.

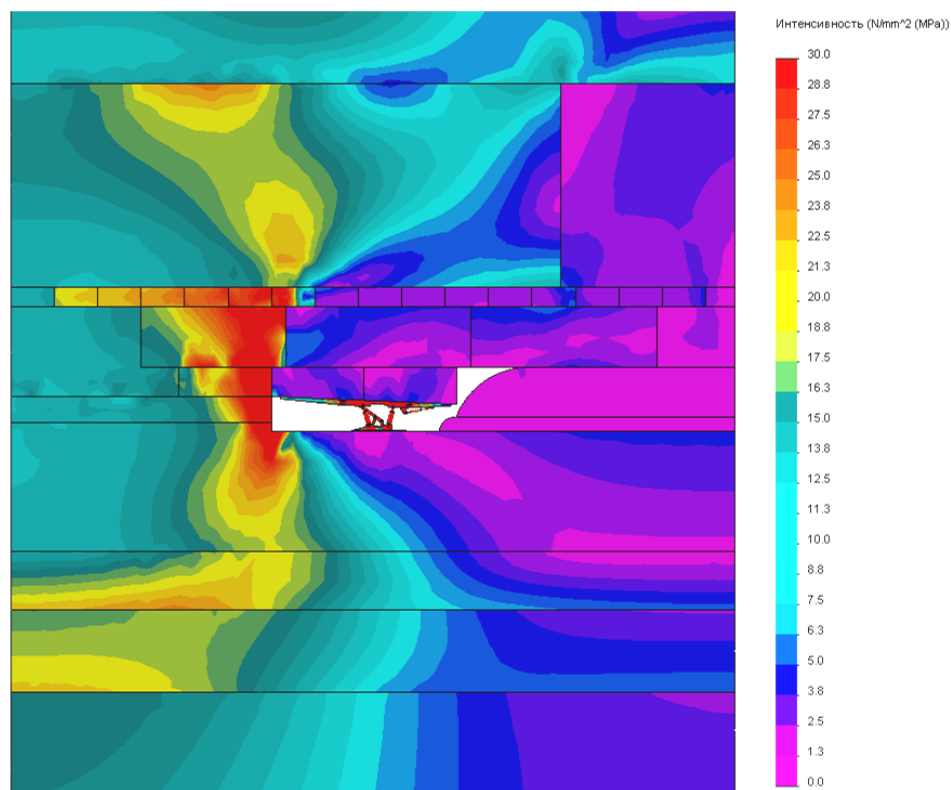


Рис. 2. Интенсивность напряжений в породном массиве при частичной закладке выработанного пространства.

Третий этап формирования породных блоков происходит за счет объединения зон концентраций напряжений образующихся на верхней и нижней границах третьего сверху от угольного пласта породного слоя. Таким образом, благодаря различным типам геомеханических процессов происходит формирование в кровле очистной выработки блочной структуры, параметры которой однозначно определяются в процессе проведения вычислительного эксперимента, что обеспечит в дальнейшем адекватность исследований эффективности применения секций механизированной крепи различных конструкций.

Блочное обрушение породных слоев непосредственной кровли очистной выработки наиболее ощутимо влияет на распределение горизонтальных напряжений следующим образом: абсолютные значения напряжений снижаются до 17 %; блоки расположенные над механизированной крепью находятся под воздействием сжимающих и растягивающих внутренних усилий; и давление породного блока непосредственной кровли провоцирует перемещение материала бутовой полосы в сторону очистного забоя. Все это хорошо согласуется с теоретическими и практическими исследованиями [10] и результатами вычислительных экспериментов проведенных ранее для условий шахт Западного Донбасса [11].

Общий вид вертикальных напряжений в слоистом породном массиве хорошо согласуется с общими представлениями о формировании горного давления, что так же является косвенным подтверждением правильности выбора параметров описания геомеханической модели при проведении вычислительного

эксперимента. Полученные эпюры вертикальных напряжений разделяются на две области сжимающих и растягивающих напряжений плоскостью проходящей параллельно и в 1,5 м от плоскости очистного забоя в сторону выработанного пространства. Часть расчетной модели примыкающая к нетронутому массиву испытывает сжимающие нагрузки, а часть вокруг выработанного пространства – растягивающие. Максимальные сжимающие напряжения концентрируются сразу за плоскостью очистного забоя.

**Определение оптимальных конструктивных характеристик секции механизированной крепи.** Как было указано выше для существующих горно-геологических условий необходимо определить наиболее оптимальную конструкцию секции механизированной крепи. В процессе анализа рассматривались три конструктивных варианта секции: традиционный; применяемый при частичной закладке; проектируемый с усиленной обратной консолью для частичной закладки выработанного пространства.

Начнем анализ результатов вычислительного эксперимента с изучения особенностей горизонтальных напряжений геомеханической системы. Полученные данные указывают на доминирующее направление распространения горизонтальных напряжений ориентированных поперек плоскости очистного забоя. Для проведения сравнительного анализа выделим четыре группы конструктивных элементов секции механизированной крепи: первая – основные распорные цилиндры гидросистемы; вторая – опорная плита секции; третья – верхняя плита секции крепи; четвертая – конструкция обратной консоли крепи.

При традиционной схеме добычи горизонтальные напряжения в секции крепи концентрируются в теле гидроцилиндров, в средней части опорной плиты и в конструктивных элементах обратной консоли. То есть, в целом повышенные горизонтальные напряжения для данной конструкции вызваны боковым давлением обрушенных за секцией пород непосредственной кровли очистной выработки.

В проектируемой секции крепи нагрузка на основные гидроцилиндры на 23 % меньше, а конструктивные элементы обратной консоли воспринимают нагрузку равную по величине предыдущему результату. Распределение горизонтальных напряжений в результатах расчетов проектируемой и применяемой при частичной закладке секции механизированной крепи показывает, что при селективной выемке угля для любой конструкции секции крепи, нижняя опорная плита воспринимает нагрузки в 1,5 – 1,7 раза меньше, чем верхняя. Это является фундаментальным отличием от результата полученного для модели секции крепи используемой при традиционном методе добычи угля.

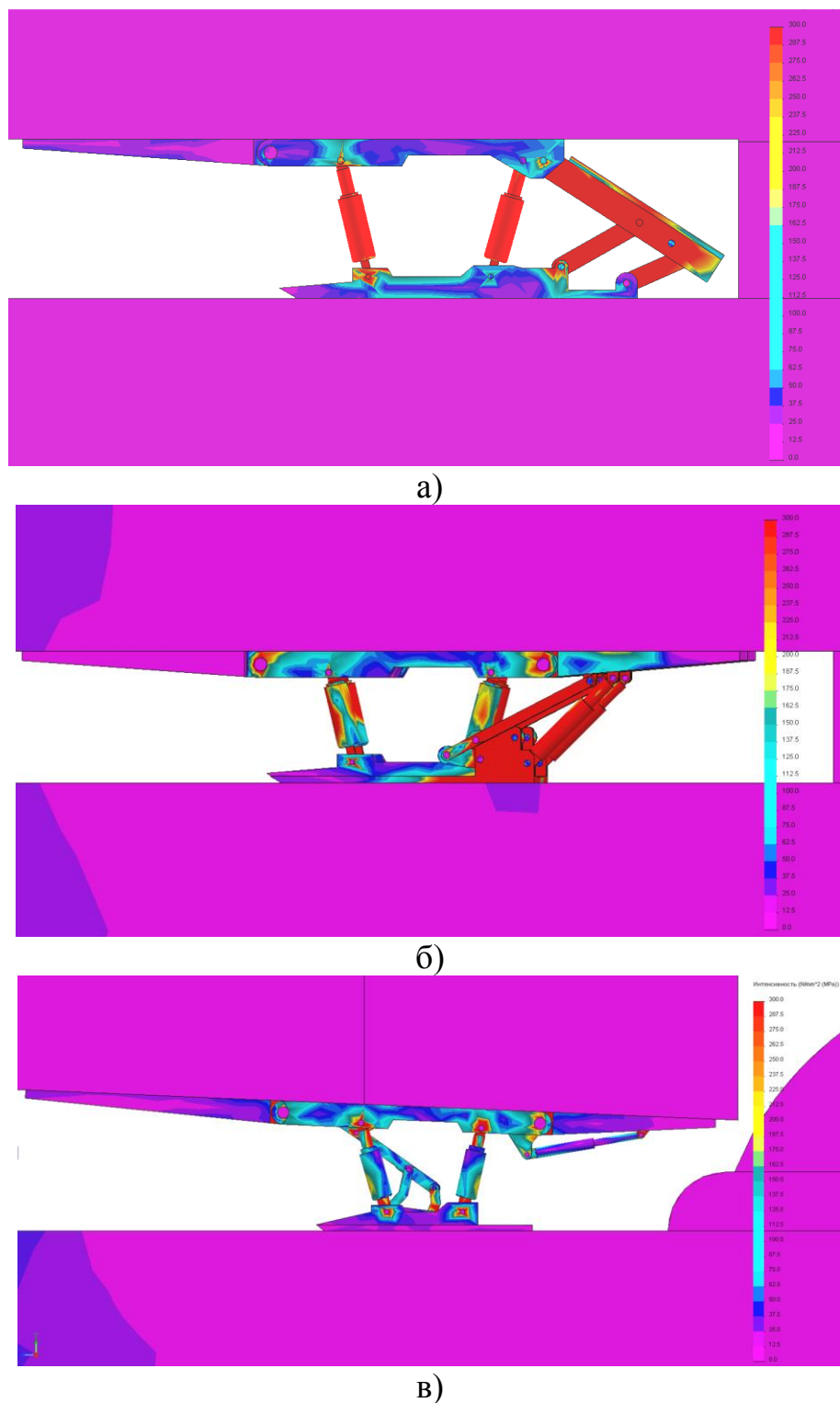


Рис. 3. Интенсивность напряжений в секции механизированной крепи: а) традиционной; б) проектируемой; в) при частичной закладке

Модель секции крепи используемой при частичной закладке выработанного пространства в целом нагружена слабее, чем секции крепи в первых двух расчетах. Но выявлены две особенности концентрации горизонтальных напряжений которые снижают общий уровень запаса прочности конструкции крепи. Это зоны знакопеременных напряжений вокруг отверстий в верхней плите секции



крепи выполненные под крепления гидроцилиндров и консолей, а так же концентрация сжимающих напряжений в зоне опорных элементов гидротронов поддерживающих обратную консоль. В этом случае рост давления на обратную консоль секции механизированной крепи приведет к необратимым деформациям в конструкции, что вызовет смещения баланса нагрузок кровли выработки на крепь в сторону плоскости очистного забоя.

Максимальные значения вертикальных сжимающих напряжений в элементах секции механизированной крепи наблюдаются в результате расчетов для проектируемой секции механизированной крепи. Эти напряжения возникают в опорной плите вокруг области контакта с гидроцилиндрами поддерживающими обратную консоль. При этом основные гидроцилиндры испытывают напряжения соизмеримые (отклонение 3 – 5 %) с вариантом конструкции крепи применяемой при традиционной схеме добычи угля.. Для варианта применяемой при частичной закладке крепи концентрация растягивающих напряжений приходится на области верхней и нижней опорных плит секции крепи в которых расположены крепежные отверстия. Таким образом, максимальную опорную реакцию формирует в породном массиве система поддержания обратной консоли в проектируемой крепи, что согласуется с технологическими параметрами выбранными при конструировании.

При общем уровне сохранения запаса прочности в различных элементах секции, при частичной закладке выработанного пространства в пределах 0,08 – 0,12, в зонах концентраций напряжений, составляющих менее 3 % объема конструкции крепи, запас прочности приближается к нулю. Это указывает на тот факт, что в рассматриваемых горно-геологических условиях только последний вариант крепи функционирует на пределе возможного.

Оценим особенности концентрации напряжений в конструктивных элементах секции механизированной крепи на основе анализа изменения интенсивности напряжений (см. рис. 3). Поскольку материалы элементов стоек механизированной крепи по своим механическим характеристикам близки, отпадает необходимость применять дифференциальный анализ конструктивной прочности.

Для вариантов, представленных на рисунке 3, а и рисунке 3, б, интенсивность напряжений имеет максимальные значения в подвижных элементах секции крепи передающих нагрузки между опорными плитами. При этом в первом случае повышенные напряжения равномерно распределены между гидроцилиндрами и недеформируемыми распорками, а во втором наблюдается увеличение максимальных напряжений на 20 – 42 МПа в элементах поддерживающих обратную консоль секции относительно системы гидроцилиндров. Это приводит к росту давления крепи на почву очистной выработки на 12 – 17 МПа со стороны выработанного пространства.

Абсолютные величины концентрации напряжений для крепи, применяемой при частичной закладке (см. рис. 3, в), не превышают предельных значений полученных в двух предыдущих вариантах, но обладают двумя критическими особенностями. Во-первых, максимальная интенсивность напряжений наблюдается

в узлах контакта отдельных элементов крепи, что указывает на не согласованность деформации элементов крепи и может привести к разрушению конструкции с потерей несущей способности. Во-вторых, геометрия нижней опорной плиты секции провоцирует рост деформаций почвы очистной выработки непосредственно около плоскости очистного забоя, что при слабых вмещающих породах.

Таким образом, проектируемая и применяемая, при частичной закладке, секции механизированной крепи технологически дополняют друг друга обеспечивая возможность проведения очистных работ во всем диапазоне сложных горно-геологических условий характерных для шахт Западного Донбасса на глубинах 400 – 1000 м.

*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. Исследования геомеханической модели породного массива и очистной выработки пройденной в нем и поддерживаемой секцией механизированной крепи показали, что при блочном обрушении породных слоев кровли выработки динамические изменения напряженно-деформированного состояния горного массива зависят от высоты и местоположения породных слоев кровли выработки в которых возникает концентрация напряжений с величинами в пределах до 80 % от напряжений возникающих перед очистным забоем. При этом изменяются геометрические величины образуемых блоков и механический характер разрушения породных слоев.

2. Секция крепи, используемая при частичной закладке выработанного пространства очистной выработки, обладает конструктивными особенностями которые снижают предельный уровень несущей способности в виду отсутствия эффективного механизма распределения нагрузки между отдельными узлами конструкции, что не позволяет быстро рассеивать энергию деформации при наличии динамических процессов в породном массиве. Низкий запас прочности элементов поддержания обратной консоли секции крепи требует увеличения объемов породы при закладке выработанного пространства, что накладывает ограничения на высоту пресекаемых пород.

3. Проектируемая секция механизированной крепи позволяет преодолеть конструктивные особенности применяемой при частичной закладке крепи за счет увеличения до 0,12 запаса прочности элементов поддерживающих обратную консоль, что достигается введением дополнительных жестких конструктивных элементов. При этом снижается уровень концентрации напряжений в узлах сопряжения конструкции крепи. Однако данный эффект приводит к перераспределению давления секции крепи на почву очистной выработки, что при определенных прочных характеристиках вмещающих пород вызовет неравномерное вдавливание опорной плиты в примыкающий породный слой.

### 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*, 11(1), 100–105. doi: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*, 221–226. doi:10.1201/b19901-39
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. doi: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. doi:10.15407/mining12.03.087
7. Sotskov, V.O., Podvyhina, O.O., Dereviahina, N.I., & Malashkevych, D.S. (2018). Substantiating the criteria for applying selective excavation of coal deposits in the Western Donbass. *Вісник Дніпропетровського Університету. Геологія, Географія*, 26(1), 158–164. doi:10.15421/111817
8. Fomychov, V., & Sotskov, V. (2018). Determination of parameters of non-uniform fractured rock massif in computing experiment. *Вісник Дніпропетровського Університету. Геологія, Географія*, 26(1), 26–32. doi: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. doi:10.5277/msc182515
10. Mamaikin, O., Sotskov, V., Demchenko, Y., & Prykhorchuk, O. (2018). Productive flows control in coal mines under the condition of diversification of production. *E3S Web of Conferences*, 60, 00008. doi: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. *E3S Web of Conferences*, 60, 00035. doi:10.1051/e3sconf/20186000035

### АНОТАЦІЯ

**Мета.** Метою системного аналізу стану покрівлі очисної виробки і розподілу навантаження в конструкційних елементах механізованого кріплення є визначення системи вибору оптимальної конфігурації секції кріплення очисного забою заснованої на прогнозі якісних показників деформування приконтурних породних шарів.

**Методика.** Обчислювальний експеримент проведений на основі тривимірного моделювання геомеханічної системи очисної виробки, що проведена в шаруватому породному масиві методом кінцевих елементів з використанням нелінійних закономірностей зміни напружено-деформованого стану досліджуваного об'єкта.

**Результати.** Розроблені розрахункові моделі геомеханічної системи дозволили визначити картину деформації безпосередньої покрівлі очисної виробки при різних схемах управління процесом її опускання. Прогнози деформування і руйнування породних шарів, отримані при дослідженні можливих структур зміни стану породного масиву, були використані для організації розрахунків геомеханічної системи з різними конструкціями стійок механізованого кріплення.

**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 оцінює ефективність прийнятих технологічних рішень на етапі проектування підземних споруд.

**Практична значимість.** Розроблена методика визначення оптимальних параметрів конструкції секції механізованого кріплення очисної виробки, дозволяє комплексно скоротити витрати на проведення ремонтно-відновлювальних заходів і знизити енерговитрати пов'язані із забезпеченням працездатності очисного забою в складних гірничо-геологічних умовах.

**Ключові слова.** породний масив, очисна виробка, напружено-деформований стан, секція кріплення, механізоване кріплення, експеримент, закладка.

#### ABSTRACT

**Purpose.** The purpose of the system analysis of the state of the roof of the clearing generation and load distribution in the structural elements of mechanized lining is to determine the system of choosing the optimal configuration of the lining section of the working face based on the prediction of quality indicators of deformation of near-ground rock layers.

**Materials and methods.** The computational experiment was carried out on the basis of a three-dimensional modeling of the geomechanical system of the clearing generation of the rock mass with a layered array using the finite element method using nonlinear regularities of the change in the stress-strain state of the object under study.

**Results.** The developed computational models of the geomechanical system made it possible to determine the deformation pattern of the immediate roof of the clearing generation under various schemes for controlling the process of its lowering. Predictions of deformation and destruction of rock layers, obtained from the study of possible patterns of change in the state of the rock mass, were used to organize calculations of the geomechanical system with various designs of mechanized support struts.

**Scientific novelty.** Using to determine the effectiveness of the selected mounting scheme integrated multi-criteria approach based on measurements of the contour generation and internal efforts of the mounting elements allows you to assess 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 underground facilities design stage.

**Practical significance.** The developed method of determining the optimal design parameters of the section of mechanized lining of the clearing generation allows to comprehensively reduce the cost of carrying out repair and restoration measures and reduce the energy consumption associated with ensuring the efficiency of the stope in difficult mining and geological conditions.

**Keywords.** rock mass, cleaning development, stress-strain state, lining section, power support, experiment, bookmark.