

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УПРОЧНЕННОГО ПРИКОНТУРНОГО МАССИВА ВЫЕМОЧНОЙ ВЫРАБОТКИ КОМБИНИРОВАННОЙ АНКЕРНОЙ СИСТЕМОЙ

И. Ковалевская<sup>1\*</sup>, М. Барабаш<sup>2</sup>, А. Гусев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Кафедра подземной разработки месторождений, Национальный горный университет, Днепропетровск, Украина

<sup>2</sup>ООО "ДТЭК Энерго", Киев, Украина

<sup>3</sup>ШУ "Першотравенское" ПАО "ДТЭК Павлоградуголь", Павлоград, Украина

\*Ответственный автор: e-mail [kovalevska\\_i@yahoo.com](mailto:kovalevska_i@yahoo.com), тел. +380567560047, факс: +380563742184

## RESEARCH INTO STRESS-STRAIN STATE OF REINFORCED MARGINAL MASSIF OF EXTRACTION MINE WORKING BY COMBINED ANCHORING SYSTEM

I. Kovalevska<sup>1\*</sup>, M. Barabash<sup>2</sup>, O. Gusiev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Underground Mining Department, National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine

<sup>2</sup>LLS "DTEK Energy", Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup>MA "Pershotravenske" PJSC "DTEK Pavlograduhillia", Pavlohrad, Ukraine

\*Corresponding author: e-mail [kovalevska\\_i@yahoo.com](mailto:kovalevska_i@yahoo.com), tel. +380567560047, fax: +380563742184

### ABSTRACT

**Purpose.** Justification of conditions for reusal of extraction mine working by maintaining system parameters of resin-grouted and rope roof bolts.

**Methods.** Wide range of investigation of stress-strain state of coal-bearing massif condition and combined support system of resin-grouted and rope roof bolts was carried out by the method of computing experiment.

**Findings.** The results are related to stress-strain state of coal bearing massif conditions around reused extraction mine working during roof reinforcement by combined anchoring system consisting of resin-grouted and rope roof bolts.

**Originality.** The new task solution by the method of computational experiment is shown in the paper. Curves characterizing the stress-strain state of the system "rock massif – combined anchored reinforcement" are received. The investigations carried out are the basis for support system selection, adapted to the character of rock pressure manifestation.

**Practical implications.** Analytical investigations are the basis for selecting optimal support system aimed at its loading and improving exploitation characteristics that are essential part of increasing the rock massif stability.

**Keywords:** coal bearing massif, stress-strain state condition, extraction mine working, resin-grouted and rope anchors

### 1. ВВЕДЕНИЕ

На шахтах Западного Донбасса имеется опыт применения комбинированных анкерных систем в составе сталеполимерных и канатных анкеров для поддержания кровли пластовых выработок в зоне влияния очистных работ, но, пока такие технические решения носят экспериментальный характер и не имеют должного распространения на различные горно-геологические и горнотехнические условия, в том числе и на выемочные выработки, которые планируется повторно использовать (Kovalevska, Fomyuchov & Vivcharenko, 2010; Rotkegel, Prusek, Kuziak & Gro-

dzicki, 2013). В этой связи проведен широкий спектр вычислительных экспериментов методом конечных элементов (МКЭ) по расчету напряженно-деформированного состояния (НДС) массива вокруг выемочной выработки, поддерживаемой позади очистного забоя в зоне стабилизации проявлений горного давления, неизменной составляющей которых являлись комбинированные анкерные системы для упрочнения кровли штрека. Конструкции этих систем различаются между собой преимущественно по количеству сталеполимерных анкеров в кровле и параметрам их расположения, а также комбинацией с канатными анкерами.

## 2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Проведенные многовариантные вычислительные эксперименты достаточно обширны (Kovalevska, Iliashov, Fomychov & Chervatuk, 2012; Sdvizhkova, Kovgov & Kirgiak, 2014), поэтому рассмотрен один из оптимальных вариантов комбинированных анкерных систем: два сталеполимерных анкера в центральной части свода и два канатных анкера в его периферийной части, который сравнивается с традиционной схемой поддержания выемочного штрека, например, для условий отработки пласта  $C_6$ . Для данного варианта изложены результаты анализа по распределению трех основных компонент напряжений (вертикальных  $\sigma_y$ , горизонтальных  $\sigma_x$  и интенсивности напряжений  $\sigma$ ) в массиве; но, во главу угла положены особенности эпоры распределения интенсивности напряжений  $\sigma$ , как обобщающей характеристики напряженного состояния любого объекта.

Анализ эпоры интенсивности напряжений (Рис. 1) в окружающем выработку массиве при использовании комбинированной анкерной системы взамен базовой (отсутствие канатных анкеров) показал ряд изменений в состоянии близлежащих пород. В кровле выемочного штрека образуется зона разгрузки  $\sigma$ , отличающаяся от таковой для базовой схемы крепления по своей форме и размерам. Во-первых, разгрузка практически не затрагивает породы непосредственной кровли: со стороны выработанного пространства образуется локальная область с величиной  $\sigma$ , соответствующей состоянию нетронутого массива; в породах над центральной частью свода возникает область с концентрацией  $\sigma$  уровня 1.6–2.0 от начального состояния нетронутого массива. По абсолютной величине эта концентрация  $\sigma$  не представляет опасности, так как в 3.0–3.8 раза ниже сопротивления сжатию песчаника непосредственной кровли. На данный факт необходимо обратить внимание по следующей причине. Обычно в непосредственной кровле над выработкой образуется зона разгрузки, где пониженные  $\sigma$  (также как и другие компоненты напряжений) характеризуют прогиб породного слоя в полость выработки с соответствующими его горизонтальными подвижками. Если породный слой целостный, то его горизонтальные подвижки не снижают сопротивления вертикальному горному давлению. Но, как правило, непосредственная кровля разбита трещинами разрыва на породные блоки (Lobkov, 2003; Instruksiya..., 1994; Bondarenko, Kovalevska, Simanovich, Barabash & Gusev, 2015) и если (благодаря горизонтальным подвижкам) породные блоки выйдут из контакта друг с другом, то при их прогибе распорной конструкции не образуется, а породные блоки обрушаются на рамную крепь. При наличии горизонтального распора породные блоки сопротивляются вертикальному горному давлению, а именно небольшая концентрация  $\sigma$  указывает на повышенный горизонтальный распор породных блоков. На наш взгляд, описанное состояние непосредственной кровли сформировалось благодаря ее соединению с основной кровлей посредством канатных анкеров, – образуется весьма мощная армопородная плита высокой несущей способности.

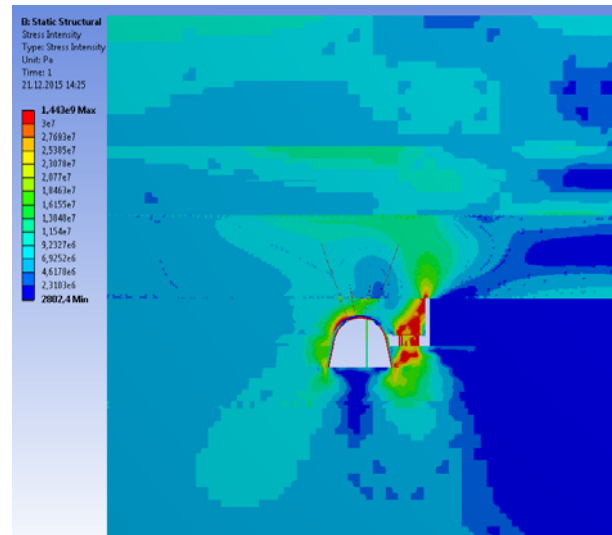


Рисунок 1. Эпора распределения интенсивности напряжений  $\sigma$  в породном массиве, окружающем выемочную выработку, поддерживаемую с использованием комбинированных анкерных систем

Во-вторых, характер распределения  $\sigma$  в первом слое основной кровли (представленном мощным алевролитом) указывает на возможность частично независимого прогиба основной и непосредственной кровли с некоторыми горизонтальными подвижками относительно друг друга благодаря ограниченной податливости каната за счет его удлинения при растяжении. Именно такая возможность (хотя и ограниченная) горизонтальных перемещений относительно друг друга способствует появлению в последней локальной области разгрузки размерами в плоскости сечения  $0.7 \times 1.0$  м. Уровень разгрузки составляет 0.4–0.8 от величины начального состояния нетронутого массива и указывает на сохранение части горизонтального распора в пределах этой локальной области, выше которой состояние алевролита переходит в исходное начальное, а далее на половине мощности породного слоя основной кровли действует концентрация  $\sigma$  уровня 1.2–2.0. Данная концентрация характеризует действие распорных усилий при сопротивлении прогибу нижнего слоя основной кровли, а абсолютные значения  $\sigma$  в 1.75–2.91 раза ниже сопротивления сжатию алевролита.

Таким образом, можно сделать следующий вывод: абсолютной жесткости армопородной плиты из основной и непосредственной кровли добиться не удалось, но этого и не требуется по причине их совместного и активного сопротивления вертикальному горному давлению в пределах напряжений  $\sigma$ , весьма далеких от разрушающих. В то же время, в базовой схеме крепления зона разгрузки проходит через всю мощность непосредственной кровли с весьма вероятным ее обрушением.

Единственным негативным обстоятельством является появление в приконтурной области со стороны нетронутого массива участка разупрочненных пород на глубину до 0.15–0.20 м, который, тем не менее, не может существенно повлиять на сопротивление непо-

средственной кровли вертикальному горному давлению; напротив, эта концентрация  $\sigma$  лишней раз подчеркивает активное вовлечение пород непосредственной кровли в противодействие процессам сдвижения надугольной толщи.

В прилегающих боковых породах со стороны нетронутого массива наблюдается еще одна особенность в распределении интенсивности напряжений – пониженные  $\sigma$  в сравнении с базовым вариантом крепления. Так, концентрация  $\sigma$  составляет 1.6 – 2.0 на ширину в массив до 2.1 м, которая многократно меньше сопротивления сжатию как пород непосредственной кровли, так и угольного пласта; в слабых породах непосредственной почвы такая концентрация вызывает их разупрочнение и способствует интенсификации процесса пучения.

Если сравнивать боковое опорное давление при использовании комбинированной анкерной системы, то оно в 2 – 3 раза ниже по отношению к базовому варианту крепления. Очевидно, это происходит потому, что сформированная армопородная плита в кровле имеет повышенную площадь опирания на боковые породы; тогда их напряженность снижается. Более высокие концентрации  $\sigma$  наблюдаются только в приконтурных породах на ширину до 0.3 – 0.7 м, но ни для пород непосредственной кровли, ни для угольного пласта они не представляют опасности в плане разупрочнения.

Со стороны выработанного пространства над и под охранной конструкцией формируются высокие концентрации  $\sigma$ , что обусловлено относительно небольшой площадью опоры в виде охранной системы, которая, как правило, провоцирует разупрочнение определенных объемов пород непосредственной кровли и почвы. Повышенная крепость пород непосредственной кровли ограничивает область разупрочнения: на контакте с охранной конструкцией разупрочнение прогнозируется по всей ее ширине, а на границе с основной кровлей ширина разупрочнения пород не превышает 0.3 м. В породах непосредственной почвы глубина разупрочнения достигает 6.5 м при ширине до 3.1 м, что, безусловно, генерирует активное сдвижение пород почвы пласта в полость выработки.

Из приведенных сведений следует, что для повышения жесткости опоры (армопородной плиты в кровле) со стороны выработанного пространства необходимо ограничение области разупрочнения над и под охранной конструкцией. Но, это представляет уже другую, отдельную задачу, которая рассмотрена, например, в работе (Skirachka, Mukhin & Chervatyuk, 2002). Здесь же отметим, что по ширине влияния канатного анкера (со стороны выработанного пространства) в примыкающих к выработке породах непосредственной кровли концентрация  $\sigma$  далека от разрушающей; то же наблюдается и в нижнем слое основной кровли. То есть, прогнозируется целостность армопородной плиты, формируемой комбинированной анкерной системой; следовательно, эта плита будет активно противодействовать вертикальному горному давлению (Shashenko, Sdvizhkova, Zhuravlev & Dubitska, 2015).

В слабых породах почвы выемочной выработки по ее ширине традиционно образуется зона разгрузки, распространяющаяся по глубине до 5.5 м. В угловых частях выработки (как со стороны нетронутого массива, так и со стороны выработанного пространства) действуют разрушающие концентрации  $\sigma$  в обширных областях пород почвы. Данные области разупрочнения под воздействием концентраций  $\sigma$  будут способствовать перемещению пород в зону разгрузки и далее в полость выработки. Поэтому можно прогнозировать достаточно интенсивное пучение пород почвы штрека. Здесь влияние комбинированной анкерной системы прослеживается в меньшей степени, а основным фактором пучения является весьма низкая крепость пород почвы. Тем не менее, размеры областей разупрочнения в почве заметно ниже, чем при базовом варианте крепления и главной причиной тому является, на наш взгляд, менее интенсивное опорное давление в боках выемочной выработки.

Подводя итоги особенностям распределения интенсивности напряжений в близлежащем породном массиве следует отметить позитивное влияние комбинированной анкерной системы, в первую очередь, на состояние пород кровли, где по основным признакам формируется армопородная плита достаточно высокой устойчивости; под ее защитой прогнозируется удовлетворительное состояние выемочной выработки.

Позитивные особенности, подчеркивающие процесс формирования армопородной плиты в кровле с помощью комбинированной анкерной системы, достаточно четко проявляются на эпюре горизонтальных напряжений  $\sigma_x$ . В первую очередь рассмотрена область концентраций сжимающих  $\sigma_x$ , распространяющихся по всей ширине свода и мощности непосредственной кровли. Величина  $\sigma_x \leq 18 - 25$  МПа достаточно высока в сравнении с исходным состоянием нетронутого массива (коэффициент концентрации достигает 5.2 – 7.3), но это не вызывает разупрочнения пород непосредственной кровли. Примечательно другое – повышенные горизонтальные сжимающие напряжения действуют по всей мощности слоя, создавая такой распор в породных блоках непосредственной кровли, который не допускает существенных ее прогибов в полость выработки. В боковых частях (по отношению к выработке) непосредственной кровли также имеет место относительно неоднородное поле распределения сжимающих  $\sigma_x$  по ее мощности, – здесь опять-таки происходит распор породных блоков. В результате распорная блочная система в непосредственной кровле не только устойчива сама по себе (удерживает собственный вес), но и активно сопротивляется нагрузке со стороны основной кровли.

В породных слоях основной кровли наблюдается их изгиб, судя по характеру распределения  $\sigma_x$  по мощности каждого литотипа. Со стороны выработанного пространства изменение знака кривизны слоев фиксирует направление поверхности полных сдвижений (опускание блоков основной кровли на обрушенные породы непосредственной) в соответствии с существующими представлениями о процес-

сах сдвижения надугольной толщи при очистной выемке. Начало этой поверхности находится за пределами ширины охранной системы и удалено от выработки (в сторону выработанного пространства) на расстояние 2.5 – 3.0 м. В данной области прослеживается изгиб породных слоев основной кровли с появлением небольших растягивающих  $\sigma_x$  до 1.0 – 2.5 МПа в верхней части каждого слоя; однако, распространение растяжения весьма ограничено и составляет всего 5 – 10% от мощности слоев. По остальной мощности слоев действуют сжимающие  $\sigma_x$ , обеспечивающие их устойчивое состояние за счет распора. Величина  $\sigma_x$  в большей части областей основной кровли изменяется в диапазоне, близком к начальному состоянию нетронутого массива, и многократно меньшем величин сопротивления литотипов сжатию.

Таким образом, по фактору распределения компоненты  $\sigma_x$  в породах кровли прогнозируется их устойчивое состояние; особенно это касается непосредственной кровли, где (в отличие от базового варианта крепления) комбинированная анкерная система создает высокие усилия распора между породными блоками, связывает их с породами основной кровли и обеспечивает, тем самым, достаточное сопротивление вертикальному горному давлению.

Образованная армопородная плита в кровле имеет расширенную площадь опирания на породы в боках выработки, о чем свидетельствует практически однородное поле  $\sigma_x$  (со стороны нетронутого массива) за исключением локальных участков приконтурных пород на ширину до 0.8 м; в базовом варианте аномалии  $\sigma_x$  распространяются на 4.0 – 4.5 м в боку выработки. Со стороны выработанного пространства в породах непосредственной почвы (по глубине нижней подрывки штрека) возмущения  $\sigma_x$  не столь развиты, как в базовом варианте крепления и в большей части данной области имеют небольшие отклонения от начального состояния нетронутого массива. Здесь можно предположить пониженное боковое опорное давление за счет того, что опускающиеся в выработанное пространство породные блоки основной кровли имеют определенный распор с породными слоями над выработкой и за счет него сохраняют часть несущей способности по противодействию вертикальному горному давлению.

В области пород почвы непосредственно под выработкой аномалии  $\sigma_x$  также не столь велики, но имеется область растяжения глубиной до 0.6 м, где происходит расслоение (от действия  $\sigma_x$ ) и перемещение пород в полость выработки.

В целом, по результатам анализа поля распределения горизонтальных напряжений можно подтвердить ранее сделанный вывод о том, что комбинированная анкерная система способствует созданию достаточных усилий распора для сохранения устойчивости непосредственной кровли, с одной стороны, а, с другой, – объединяя непосредственную кровлю с основной, создает армопородную плиту высокой несущей способности.

В заключение анализа НДС близлежащего породного массива рассмотрены особенности распределения вертикальных напряжений  $\sigma_y$ . В кровле штрека зона разгрузки от напряжений  $\sigma_y$  существенно отличается от таковой при базовой схеме крепления и это отличие направлено в сторону снижения размеров зоны и степени разгрузки:

– разгрузка уровня  $\frac{\sigma_y}{\gamma H} = 0.47 - 0.83$  распространяется в кровлю всего до 1.8 м против 4.3 м в базовой схеме крепления;

– более глубокая степень разгрузки  $\frac{\sigma_y}{\gamma H} = 0.10 - 0.47$

имеет место в приконтурных породах на высоту до 0.6 м и занимает ширину до 1.9 м; в базовой схеме крепления эти размеры составляют 2.0 и 3.5 м соответственно, что указывает на распространение весьма глубокой разгрузки по всей мощности непосредственной кровли и по большей части ширины свода выработки;

– полной разгрузки ( $\sigma_y = 0$ ) с появлением растягивающих  $\sigma_y$  практически не наблюдается в отличие от базовой схемы крепления.

Приведенные данные свидетельствуют об отсутствии свода предельного равновесия, который образуется при расслоении пород кровли за счет действия растягивающих  $\sigma_y$ . Это обусловлено, на наш взгляд, формированием (с помощью канатных анкеров) мощной армопородной плиты, не допускающей значительных прогибов над выработкой, а локальные расслоения в центральной части свода предупреждают сталеполлимерные анкера.

Другой особенностью является маловыраженная зона опорного давления со стороны нетронутого массива. Здесь наблюдается концентрация сжимающих  $\sigma_y$  всего (1.2 – 1.9)  $\gamma H$  и лишь в локальных областях приконтурных пород на ширину 0.2 – 0.5 м действуют повышенные концентрации уровня (3.0 – 4.2)  $\gamma H$ . Такое поведение пород в боку выработки объясняется повышенной площадью опирания армопородной плиты в кровле, распределяющей вертикальную нагрузку более равномерно. Со стороны выработанного пространства действует высокая концентрация  $\frac{\sigma_y}{\gamma H} = 3.0 - 4.2$  над и под охранной

конструкцией, но эта область распространяется по высоте в кровлю в 1.7 раза и по глубине в почву в 2.1 раза меньше, чем при базовой схеме крепления. Главная причина здесь видится в частичном сохранении распорных усилий между породными блоками над выработкой и со стороны выработанного пространства; эти распорные усилия позволяют до некоторой степени создать противодействие вертикальному горному давлению и распределить его по большей площади, в том числе, и в сторону выработанного пространства; большая площадь распределения опорного давления снижает его концентрацию.

В почве выработки зона разгрузки  $\sigma_y$  также меньше как по размерам, так и по степени разгрузки в сравнении с базовой схемой крепления. Это обусловлено снижением параметров зон опорного давления в боках выработки.

### 3. ВЫВОДЫ

Таким образом, анализ состояния углевмещающего массива вокруг выемочной выработки убедительно доказывает, что применение комбинированных анкерных систем позволяет более эффективно использовать несущую способность пород кровли за счет сохранения усилий распора между породными блоками и формирования армопородной плиты, а это, в свою очередь, по аналогии с “цепной реакцией” снижает интенсивность аномалий НДС в боках и почве выемочной выработки. Из этого следует вывод о позитивном влиянии комбинированных анкерных систем на устойчивость окружающего породного массива, что ограничивает нагружение крепежной системы выемочных выработок и повышает их эксплуатационные характеристики.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Данная работа выполняется благодаря поддержке ООО “ДТЭК Энерго” и ПАО “ДТЭК Павлоградуголь”. Дополнительная финансовая поддержка осуществляется при выполнении госбюджетных комплексных проектов 2014 – 2016 гг. (ГП-469, № г/р. 0114U006105; ГП-474, № г/р. 0115U002295). Авторы работы выражают благодарность руководителю департамента по техническому развитию дирекции по добыче угля ДТЭК, канд. техн. наук Вивчаренку Александру Васильевичу и руководителю департамента по производству дирекции по добыче угля ДТЭК, канд. техн. наук Черватюку Виктору Григорьевичу за поддержку в проведении экспериментальных исследований.

### ABSTRACT (IN RUSSIAN)

**Цель.** Обоснование условий повторного использования выемочных выработок управлением параметрами системы из сталеполимерных и канатных анкеров.

**Методика.** Методом вычислительного эксперимента проведен широкий спектр исследований напряженно-деформированного состояния углевмещающего массива и комбинированной крепежной системы из сталеполимерных и канатных анкеров.

**Результаты.** Приведены результаты анализа напряженно-деформированного состояния углевмещающего массива вокруг повторно используемой выемочной выработки при упрочнении ее кровли комбинированной анкерной системой в составе сталеполимерных и канатных анкеров.

**Научная новизна.** В работе представлено новое решение задачи методом вычислительного эксперимента и получены эпюры, характеризующие напряженно-деформированное состояние системы “массив – комбинированное анкерное упрочнение”. Проведенные исследования являются основой для выбора крепежной системы, адаптированной к характеру проявлений горного давления.

**Практическая значимость.** Проведенные аналитические исследования являются базой для выбора оптимальной крепежной системы с целью ограничения ее нагружения и повышения эксплуатационной характеристики, что является существенной составляющей повышения устойчивости породного массива.

**Ключевые слова:** углевмещающий массив, напряженно-деформированное состояние, выемочная выработка, сталеполимерные и канатные анкера

### REFERENCES

- Bondarenko, V., Kovalevska, I., Simanovich, G., Barabash, M., & Gusev, A. (2015). *Vzaimodeystvie gruzonesushchikh elementov krepozhnoy sistemy vyemochnykh vyrobotok “massiv – rama – anker”*, (p. 5-20). Dnepropetrovsk: Litograf.
- Instruktsiya po podderzhaniyu gornyx vyrabotok na shakhtakh Zapadnogo Donbassa (1994), 95.
- Kovalevska, I., Fomychov, V., & Vivcharenko, O. (2010). Calculation substantiation of the yield lock model of the polygonal yieldable support with elongated props by means of experiment. *New Techniques and Technologies in Mining*, 83-87. <http://dx.doi.org/10.1201/b11329-15>
- Kovalevska, I., Illiashov, M., Fomychov, V., & Chervatuk, V. (2012). The formation of the finite-element model of the system “undermined massif – support of stope”. *Geomechanical Processes During Underground Mining*, 73-79. <http://dx.doi.org/10.1201/b13157-13>
- Lobkov, N.I. (2003). Issledovaniya izmeneniya opornogo davleniya vpered i ochistnykh zaboev pologikh plastov. *Fiziko-tehnicheskie problemy gornogo proizvodstva*, (6), 78-80.
- Rotkegel, M., Prusek, S., Kuziak, R., & Grodzicki, M. (2013). Microalloyed steels for mining supports. *Annual Scientific-Technical Collection – Mining of Mineral Deposits 2013*, 53-58. <http://dx.doi.org/10.1201/b16354-12>
- Sdvizhkova, Ye.A., Kovrov, A.S., & Kiriak, K.K. (2014). Geomechanical assessment of landslide slope stability by finite element method. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 86-92.
- Shashenko, A.N., Sdvizhkova, Ye.A., Zhuravlev, V.N., & Dubitska, M.S. (2015). Forecast of disjunctive based on mathematical interpretation of acoustic signal phase characteristics. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 61-65.
- Skipochka, S., Mukhin, A., & Chervatyuk, V. (2002). *Geomekhanika okhrany vyemochnykh shtrekov v neustoychivyykh porodakh*, (p. 51-73). Dnepropetrovsk: NGA Ukrainy.

## **ABSTRACT (IN UKRAINIAN)**

**Мета.** Обґрунтування умов повторного використання виїмкових виробок керуванням параметрами системи зі сталеполімерних і канатних анкерів.

**Методика.** Методом обчислювального експерименту проведений широкий спектр досліджень напружено-деформованого стану вуглевміщуючого масиву й комбінованої системи зі сталеполімерних і канатних анкерів.

**Результати.** Наведено результати аналізу напружено-деформованого стану вуглевміщуючого масиву навколо виїмкової виробки, що повторно використовується, при зміцненні її покрівлі комбінованою анкерною системою у складі сталеполімерних і канатних анкерів.

**Наукова новизна.** У роботі представлено нове рішення задачі методом обчислювального експерименту й отримано епюри, що характеризують напружено-деформований стан системи “масив – комбіноване анкерне зміцнення”. Проведені дослідження є основою для вибору кріплення системи, адаптованої до характеру проявів гірського тиску.

**Практична значимість.** Проведені аналітичні дослідження є базою для вибору оптимальної кріпильної системи з метою обмеження її навантаження і підвищення експлуатаційної характеристики, що є суттєвою складовою підвищення стійкості породного масиву.

**Ключові слова:** *вуглевміщуючий масив, напружено-деформований стан, виїмкова виробка, сталеполімерні й канатні анкери*

## **ARTICLE INFO**

Received: 11 October 2016

Accepted: 23 November 2015

Available online: 30 March 2016

## **ABOUT AUTHORS**

Iryna Kovalevska, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Underground Mining Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 4/57, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: [kovalevska\\_i@yahoo.com](mailto:kovalevska_i@yahoo.com)

Mykhailo Barabash, Deputy Director for Production, LLC “DTEK Energy”, 57 Lva Tolstogo St, 01032, Kyiv, Ukraine. E-mail: [BarabashMV@dtek.com](mailto:BarabashMV@dtek.com)

Oleksandr Gusiev, Director MA “Pershotravenske”, PJSC “DTEK Pavlohradvuhillia”, 76 Lenina Ave., 51400, Pavlohrad, Ukraine. E-mail: [GusevAS@dtek.com](mailto:GusevAS@dtek.com)