

УДК 622.831.325

А.Н. Шашенко¹, д-р техн. наук, проф.,
Г.Г. Сторчак¹,
А.О. Логунова¹,
А.Ю. Король²

1 – Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г.Днепропетровск, Украина, e-mail: shashenkoa@nmu.org.ua; lajana1985@gmail.com.
2 – ОП „Шахта „Димитрова“ ГП „Красноармейскуголь“, г.Димитров, Донецкая обл., Украина

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ „ПАРНЫЕ ВЫРАБОТКИ-ЦЕЛИК-ОЧИСТНОЙ ЗАБОЙ“

A.N. Shashenko¹, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
G.G. Storchak¹,
A.O. Logunova¹,
A.Yu. Korol²

1 – State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: shashenkoa@nmu.org.ua; lajana1985@gmail.com
2 – VP “Shakhta “Dimitrova” of the GP “Krasnoarmeyskugol”, Dimitrov, Donetsk oblast, Ukraine

ESTIMATION OF GEOMECHANICAL PARAMETERS OF THE “PAIR WORKINGS - PILLAR - WORKING FACE” SYSTEM

Цель. Обоснование рациональных параметров обеспечения устойчивости подготовительной выработки, проводимой вприсечку к существующей выработке навстречу движущемуся очистному забою, путем определения размеров зоны разрушения вокруг комплекса лавных выработок и нагрузки на крепь с помощью метода конечных элементов.

Методика. Геомеханическое состояние массива пород и взаимное влияние комплекса выработок подготовки и отработки очистных участков изучено путем использования метода конечных элементов в объемной и плоской постановке задачи.

Результат. Решения объемной и плоской упругопластических задач позволили установить коэффициенты концентрации напряжений, размеры зоны разрушения вокруг комплекса выработок и нагрузки на крепь, что позволяет выбрать ее элементы.

Научная новизна. Установлено, что ширина целика между парными выработками, равная 3 м, является достаточной для обеспечения необходимой устойчивости применительно к горно-геологическим условиям шахты „Добропольская“. Установлено, что сжимающие напряжения в целике со стороны присечной выработки в ситуации, когда забой штрека продвинулся за окно лавы, достигают $\sigma_y = 2,5\gamma H$.

Практическая значимость. Результаты работы позволили определить оптимальные параметры охраны вентиляционного штрека 8-й северной лавы уклона пласта m_5^{16} горизонта 450 м, проведенного вприсечку к 7 северному конвейерному штреку, при встречном движении с забоем лавы, что дало возможность обеспечить устойчивость исследуемого комплекса подготовительных выработок и применить полученный в результате выполнения данной работы опыт для условий ПСП „ШУ „Добропольское“.

Ключевые слова: подготовка выемочного поля, встречное движение забоев, парные выработки, метод конечных элементов, зоны разрушения, нагрузка на крепь, целик

Актуальность. В настоящее время одним из основных направлений повышения эффективности угледобычи на предприятиях угольного блока ДТЭК является повышение объемов добычи. Решение поставленной задачи достигается применением современного высокотехнологичного оборудования, оптимизацией технологий угледобычи, повышением нагрузки на очистные забои, уменьшением потерь угля в целиках.

Снижение времени перехода очистного оборудования с лавы на лаву на шахтах ДТЭК достигается за счет ускорения подготовительных работ по нарезке новых лав в увязке с повышающимися скоростями ведения очистных работ.

Такой подход, связанный с увязкой скорости отработки лавы и скорости подготовительных работ в но-

вой лаве, используется при отработке запасов уклонного поля на шахте „Добропольская“ ПСП „ШУ „Добропольское“ ООО „ДТЭК Добропольеуголь“.

На шахте „Добропольская“ сложилась обстановка, когда отработка 8-й южной лавы уклона пласта m_5^{16} горизонта 450 м производится с опережением графика на два месяца. Для своевременного восполнения очистной линии забоев возникла необходимость ускоренной подготовки выемочного поля 8-й северной лавы уклона пласта m_5^{16} горизонта 450 м. Этого можно было достигнуть путем проведения вентиляционного штрека 8-й северной лавы уклона пласта m_5^{16} горизонта 450 м вприсечку к 7-му северному конвейерному штреку уклона пласта m_5^{16} горизонта 450 м навстречу движущемуся очистному забою (рис. 1).

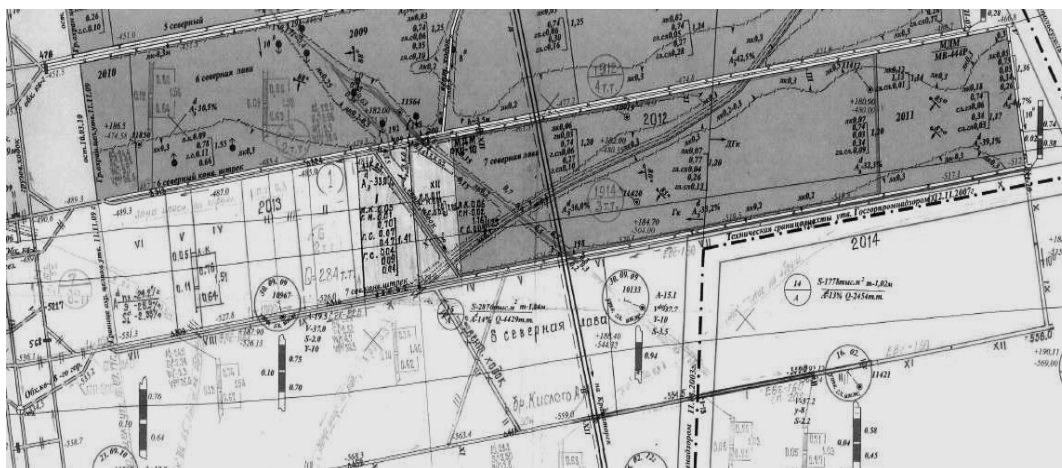


Рис. 1. Выкопировка из плана горных работ

Основным техническим решением, которое научно обосновано в ходе выполнения НИР, является проведение нового вентиляционного штрека вприсечку к конвейерному штреку отработываемой лавы с оставлением узкого целика шириной 2–3 м навстречу движущемуся очистному забою.

Целью выполнения НИР являлась разработка рекомендаций по обеспечению устойчивости вентиляционного штрека 8-й северной лавы уклона пласта m_{516} горизонта 450 м шахты „Добропольская“ при проведении его вприсечку к 7-му северному конвейерному штреку уклона пласта m_5^{16} горизонта 450 м навстречу движущемуся очистному забою (рис. 1).

В соответствии с отраслевым нормативным документом СОУ 10.1.00185790.011-2007 „Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони“, ширину целика определяли по формуле

$$h_0 = \frac{20R}{200 + R}, \quad (1)$$

где R – средневзвешенная прочность пород. При вариации средневзвешенной прочности от 15 до 40 МПа ширина целика, в соответствии с формулой (1), изменяется от 1,5 до 3 м. Поэтому в данной работе рассмотрены четыре варианта ширины целика с целью определения зон повышенного горного давления и нагрузки на крепь выработок.

Теоретические предпосылки. Осложняющим фактором при проведении штрека навстречу движущемуся забою лавы является наличие волны опорного давления впереди забоя лавы. При сокращении расстояния между забоем лавы и забоем штрека возрастает концентрация напряжений, которая приводит к разрушению пород и созданию дополнительной нагрузки на крепь выработок [1].

Определение величин концентрации напряжений составляет первую часть расчетов. Решение поставленной задачи требует рассмотрения пространственной области породного массива для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива при взаимном влиянии 7-й лавы,

7-го конвейерного штрека и вновь проводимого 8-го вентиляционного штрека.

Для оценки взаимного влияния забоев выработки и штрека в 3-D постановке использовался эффективный метод конечных элементов (МКЭ). МКЭ является одним из достаточно простых и универсальных методов решения задач механики, в том числе и механики горных пород, что освещено в работах Ержанова Ж.С., Фадеева А.Б., Амузина Б.З. и других ученых. К достоинствам данного метода можно отнести возможность использования различных типов и размеров элементов, узловые точки могут располагаться произвольно, а число их может регулироваться. Применительно к задачам механики горных пород, метод конечных элементов дает возможность более естественно учесть структурные особенности породного массива, такие как неоднородность, трещиноватость, слоистость и другие. МКЭ позволяет анализировать дискретные и континуальные системы. Также к достоинствам МКЭ можно отнести и то, что после постановки конкретной задачи и аппроксимации исследуемой области конечными элементами процесс последующего расчета строится по стандартному образцу [2, 3].

Изложение основного материала. Конечно-элементная аппроксимация расчетной схемы исследуемой области представлена на рис. 2. Конечно-элементная аппроксимация области осуществлялась посредством элементов-тетраэдров.

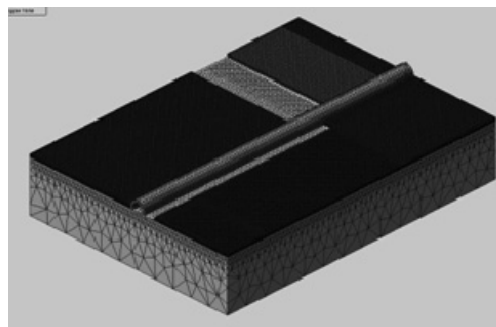


Рис. 2. Конечно-элементная аппроксимация исследуемой области

Задача сводится к решению системы уравнений, содержащих глобальную матрицу жесткости системы, элементы которой характеризуют размеры конечного элемента, его механические свойства, координаты узлов и связь между перемещениями узлов и перемещениями внутренней точки конечного элемента; вектор узловых сил системы, характеризующий внешние загрузки, в том числе массовые силы от веса пород; неизвестный вектор перемещений узлов конечно-элементной сетки.

В результате решения системы уравнений определяются значения перемещений узлов, от которых переходят к перемещениям внутренних точек элемента, а затем к относительным деформациям и напряжениям в этих точках. Таким образом, результатом вычислений есть полный тензор напряжений, деформаций и перемещений в каждом конечном элементе области [4].

Для условий поставленной задачи начальное поле напряжений, создаваемое весом вышележащих пород, для заданной глубины составляет: $\sigma_y = \gamma H = 16,94 \text{ МПа}$. Здесь $\gamma = 22 \text{ кН/м}^3$ – объемный вес пород, H – глубина разработки, принятая равной 770 м в месте предполагаемой встречи лавы и вновь проводимой выработки.

Граничные условия задаются в перемещениях: жестко закреплена нижняя граница, то есть зафиксированы (равны нулю) горизонтальные и вертикальные перемещения. Боковые вертикальные границы закреплены в горизонтальном направлении (горизонтальные перемещения равны нулю). Физико-механические свойства угля и вмещающих пород указаны в таблице.

Расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) в 3-D постановке осуществлялись с использованием программной среды SolidWorks [5].

Таблица
Физико-механические характеристики угля и вмещающих пород

Название характеристики	Уголь	Аргиллит	Алевролит
Модуль упругости (Юнга), МПа	8000	3000	6000
Коэффициент Пуассона	0,26	0,3	0,3
Прочность на сжатие, МПа	15	20	33

Проходка в массиве выработки, т.е. образование полости в массиве, вызывает перераспределение (переконцентрацию) напряжений в массиве. Понятие „повышенное горное давление“ связывают именно с областью повышенных (больших, чем начальное) напряжений. В качестве основного показателя интенсивности горного давления впереди движущихся забоев лавы и штрека использовались вертикальные нормальные напряжения σ_y .

На рис. 3–4 показаны распределения вертикальных напряжений в различных сечениях 3D модели.

Методом конечных элементов моделировались различные сечения выработок, перпендикулярные

оси штрека и находящиеся в условиях плоской деформации, с учетом коэффициентов концентрации напряжений, полученных из решения трехмерной задачи. Снижение размерности задачи позволило выполнить ее решение в упругопластической постановке. Для решения поставленной задачи использовался программный комплекс “Phase-2” от канадской лаборатории геомеханики Rocscience.

Данный программный продукт позволяет учесть разрыхление пород в процессе их деформирования, предназначен для анализа НДС породного массива в окрестности подземных и открытых выработок. Программа реализована на методе конечных элементов с учетом упругопластических свойств вмещающих пород, а также позволяет моделировать поэтапное образование выработок в неупругой среде, учитывая на каждой последующей стадии в качестве начальных те деформации, которые реализованы на предыдущей стадии формирования НДС.

Изначально моделировалась одиночная выработка (7-й конвейерный штрек). Затем, с учетом сформированного поля напряжений и реализовавшихся пластических деформаций путем изменения граничных условий, имитировалось образование следующей выработки (8-го вентиляционного штрека) с оставлением охранного целика шириной 3 метра (рис. 5). Таким образом, моделируется проведение выработки в зоне разгрузки, что имеет место в реальной ситуации и обеспечивает более устойчивое состояние „присечной“ выработки.

Для определения зон неупругих деформаций использовался обобщенный критерий Хоека-Брауна [6, 7]. Правомерность использования именно такого критерия применительно к задачам геомеханики доказана в работах Шашенко А.Н. и других ученых, а проведенные ранее сопоставления с наиболее распространенными критериями Баландина и Кулона-Мора свидетельствуют о высокой достоверности полученных результатов, особенно при оценке состояния слабых и пластических пород. Кроме того, одним из преимуществ данного критерия является его универсальность, которая заключается во введении в его структуру идеи „ненарушенного“ и „нарушенного“ массива пород при исследовании крайне неоднородной среды, в частности при моделировании ослабленных пород в месте геологических нарушений, позволяет получать результаты с высокой степенью достоверности [8].

Критерий Хоека-Брауна выражается формулой

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

где σ_1 и σ_3 – максимальные и минимальные напряжения в массиве; m_b – константа Хоека-Брауна для породного массива; s и a – постоянные величины, учитывающие генезис и состояние (качество) породного массива; σ_{ci} – предел прочности на одноосное сжатие массива пород в интактном состоянии.

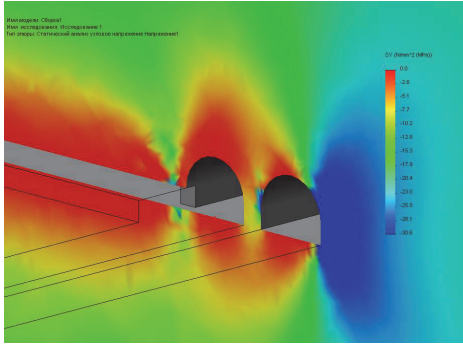


Рис. 3. Распределение вертикальных напряжений в зоне взаимного влияния лавы и штрека (поперечное сечение; красная гамма – растягивающие напряжения; темно-синяя – высокие сжимающие)

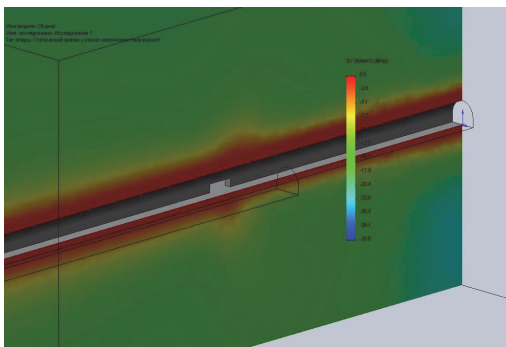


Рис. 4. Распределение вертикальных напряжений в продольном сечении области в момент, когда забой штрека прошел за окно лавы

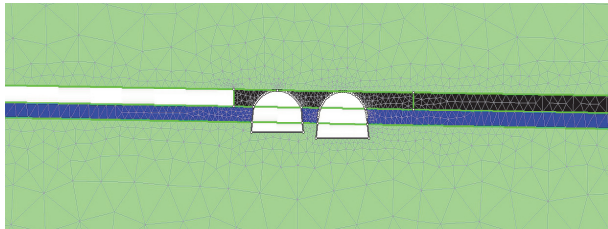


Рис. 5. Расчетная схема к решению плоской задачи о НДС при взаимном влиянии выработок в сечении, перпендикулярном продольной оси штрека

Для породного массива в интактном состоянии критерий Хоека-Брауна сводится к следующему выражению

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5}$$

Здесь константа m_i , в отличие от константы m_b , учитывает только генезис и текстуру горных пород ($4 \leq m_i \leq 33$). Большая величина m_i соответствует хрупким породам, чем она меньше, тем пластичнее порода, а при $m_i = 0$ имеет место идеальная пластичность.

На рис. 6–7 в цветовой гамме показаны зоны разрушения (неупругих деформаций) в соответствии с крите-

рием Хоека-Брауна на различных стадиях формирования выработок. Также в программе Phase 2 предусмотрена модификация критерия Хоека-Брауна применительно к оценке двух видов разрушения в точке: в виде сдвига по плоскости скольжения и растяжения.

На рис. 6–7 элементы, в которых реализовано разрушение в виде смещения, отмечены символом „X“, в виде растяжения – символом „o“.

При подходе лавы на выработки воздействует опережающее горное давление, которое проявляется в виде повышения концентрации напряжений впереди забоя лавы и при сопряжении с лавой.

Штриховкой на рис. 8 показана площадь зоны разрушения, которая принимается к расчету для определения нагрузки на крепь.

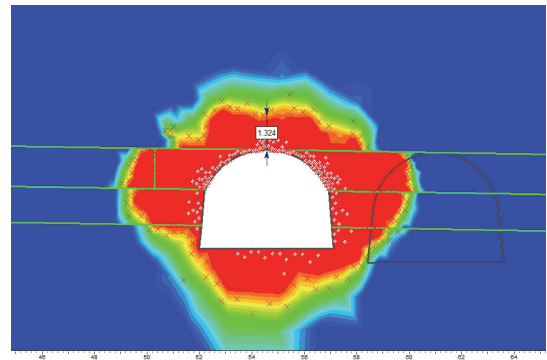


Рис. 6. Зона разрушения: стадия 1 – образован 7-й конвейерный штрек

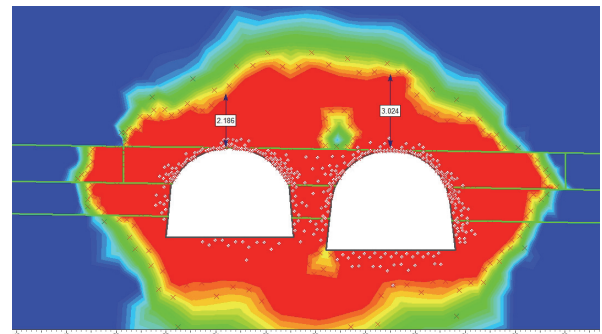


Рис. 7. Зона разрушения: стадия 2 – вприсечку пройден 8-й штрек

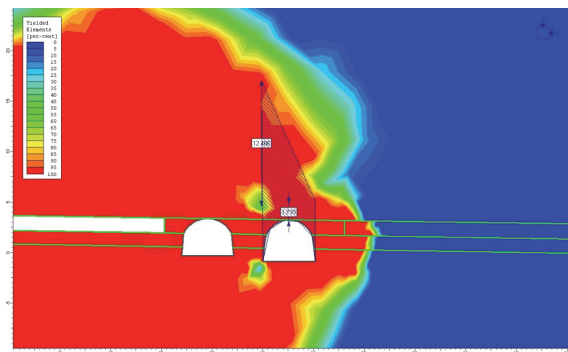


Рис. 8. Зона разрушения: стадия 3 – забой штрека продвинулся за окно встречной лавы

Моделировались ситуации при размере целика между выработками шириной: 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 м.

Нагрузка на крепь штрека определяется как вес пород в пределах зоны разрушения с учетом коэффициента динамичности, то есть

$$P = \gamma \cdot S \cdot k_n, \quad (2)$$

где S – площадь зоны разрушения; γ – объемный вес пород; k_n – коэффициент динамичности.

Площадь зоны разрушения непосредственно над крепью лавы при ширине целика 3м равна 41,1 м². Нагрузка на крепь при этом составит 90 т./м, а с учетом коэффициента динамичности $K_d = 180$ т./м.

Таким образом, необходимо обеспечить отпор, равный 180 т./м. Отпор установленной крепи равен $P = 243,6$ т./м, т.е. коэффициент запаса составит $K_{запаса} = 243,6/180 = 1,37$.

Изменение нагрузки на крепь в зависимости от ширины целика показано на рис. 9.

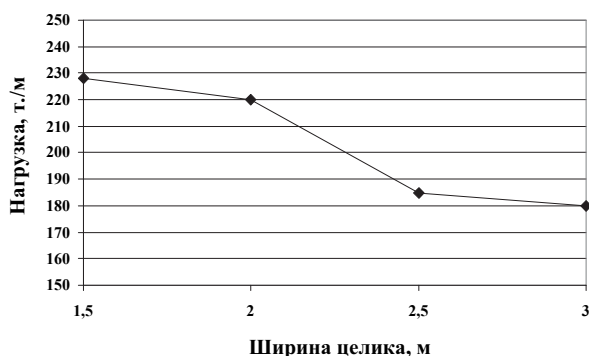


Рис. 9. Изменение нагрузки на крепь в зависимости от ширины целика

Изменение коэффициента запаса прочности крепи в зависимости от ширины целика показано на рис. 10.

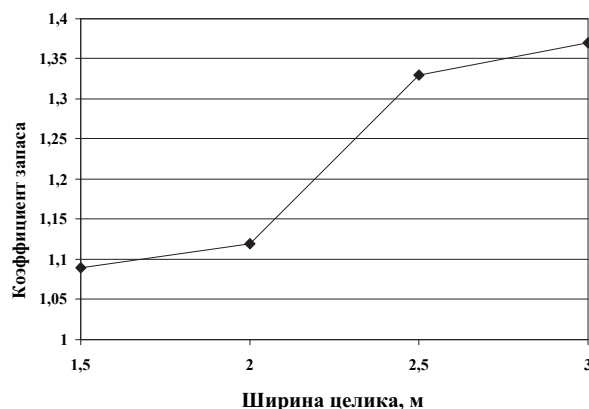


Рис. 10. Коэффициент запаса прочности крепи в зависимости от ширины целика

Выводы:

1. Наибольшие сжимающие напряжения образуются со стороны борта присечного вентиляционного штрека. В кровле и почве выработок имеют место растягивающие напряжения.

2. В целике частично возникают растягивающие напряжения, частично – со стороны присечной выработки – высокие сжимающие, достигающие уровня $\sigma_y = 2,5\gamma H$ в самый неблагоприятный момент – при ситуации, когда забой штрека продвинулся за окно лавы. Следует ожидать, что целик под действием таких высоких напряжений будет разрушен до уровня остаточной прочности.

3. Из решения объемной задачи установлены коэффициенты концентрации, используемые в дальнейшем для оценки зон разрушения вследствие совместного действия нормальных и касательных напряжений. Это позволит определить нагрузку на крепь и выбрать ее элементы.

4. Решена плоская упругопластическая задача для определения размеров зоны разрушения вокруг комплекса выработок и нагрузки на крепь.

5. Выполнена оценка влияния размера целика между выработками на величину нагрузки на крепь. Установлено, что ширина целика, равная 3м, является достаточной.

Список литературы / References

1. Шашенко О.М. Геомеханічні процеси в породних масивах: монографія / Шашенко О.М., Майхерчик Т., Сдвижкова О.О. – Дніпропетровськ: НГУ, 2005. – 319 с.
Shashenko, A.N., Sdvyzhkova, Ye.A. and Majcherchuk, T. (2006), *Neomekhanichni protsessy u porodnykh massyvakh* [Geomechanical Processes in Rock Massifs], Monograph, National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine.
2. Киричанский Г.Т. Элементы теории деформирования и разрушения горных пород / Киричанский Г.Т. – К.: Наукова думка, 1999. – 179 с.
Kurnychanskyu, H.T. (1999), *Elementy teorii deformirovaniya u razrusheniya hornykh porod* [Elements of the Theory of Deformation and Fracture of Rocks], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
3. Метод граничных элементов в задачах горной геомеханики / [Новикова Л.В., Пономаренко П.И., Приходько В.В. и др.] – Днепропетровск: Наука и образование, 1997. – 180 с.
Novikova, L.V., Ponomarenko, P.I. and Prikhodko, V.V. (1997), *Metod granichnykh elementov v zadachakh gornoj mekhaniki* [The Boundary Element Method in Problems of Mining Geomechanics], Science and Education, Dnepropetrovsk, Ukraine.
4. Левит В.В. Обоснование параметров способа обеспечения устойчивости сопряжений протяженных выработок: материалы междунар. конф. „Форум горняков“ (3–6 окт. 2012 г.) / В.В. Левит, В.В. Раскидкин // Національний гірничий університет – Дніпропетровськ, 2012. – Т. 2. – С. 100–106
Levit, V.V. and Raskidkin, V.V. (2012), “Justification of the ways to ensure stability of interfaces in long

workings”, *Proc. of the Conf. “Forum of Mining Engineers”*, October, 3–6, National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine, Vol. 2., pp. 100–106.

5. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / [Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В. и др.] – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.

Alyamovsky, A.A., Sobachkin, A.A., Odintsov, Ye.V., Kharitonovich, A.I. and Ponomarev N.B. (2005), *SolidWorks. Kompyuternoye modelirovaniye v inzhenernoy praktike* [SolidWorks. Computer modeling in engineering practice], BHV-Peterburg, St. Petersburg, Russia.

6. Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002), “Hoek-Brown criterion”, *Proc. NARMS-TAC Conference*, Toronto, Vol. 1, pp. 267–273.

7. Hoek, E. (2002). *Practical Rock Engineering*, Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 325.

8. Ковров А.С. Моделирование устойчивости борта карьера методом конечных элементов: материалы междунар. конф. „Форум горняков – 2010“ (2–5 окт. 2010 г.) / А.С. Ковров // Национальный горничий университет – Днепропетровськ, 2010. – Т. 2. – С. 94–102

Kovrov, A.S. (2010), “Modeling of pit wall stability by finite element method”, *Proc. of the Conf. “Forum of Mining Engineers”*, October, 3–5, National Mining University, Dnipropetrovsk, Vol. 2., pp. 94–102.

Мета. Обґрунтування раціональних параметрів забезпечення стійкості підготовчої виробки, що проводиться вприсічку до існуючої виробки назустріч очисному вибою, який рухається, шляхом визначення розмірів зони руйнування навколо комплексу лавових виробок і навантаження на кріплення за допомогою методу скінченних елементів

Методика. Геомеханічний стан масиву порід і взаємний вплив комплексу виробок підготовки та відпрацювання очисних ділянок вивчено шляхом використання методу скінченних елементів в об’ємній і пласкій постановці завдань.

Результат. Рішення об’ємної та плоскої пружнопластичних задач дозволили встановити коефіцієнти концентрації напружень, розміри зони руйнування навколо комплексу виробок і навантаження на кріплення, що дозволяє вибрати його елементи.

Наукова новизна. Встановлено, що ширина цілику між парними виробками, що дорівнює 3 м, є достатньою для забезпечення необхідної стійкості стосовно гірничо-геологічних умов шахти „Добропільська“. Встановлено, що стискуючі напруги в цілику з боку присічної виробки в ситуації, коли вибій штреку просунувся за вікно лави, досягають $\sigma_y = 2,5 \gamma H$.

Практична значимість. Результати роботи дозволили визначити оптимальні параметри охорони

вентиляційного штреку 8-й північної лави ухилу пласта m_5^{16} горизонту 450 м, проведеного вприсічку до 7 північного конвеєрного штреку, при зустрічному русі із забоем лави, що дало можливість забезпечити стійкість досліджуваного комплексу підготовчих виробок і застосувати отриманий у результаті виконання даної роботи досвід для умов ПСП „ШУ „Добропільське“.

Ключові слова: підготовка виімкового поля, зустрічний рух вибоїв, парні виробки, метод скінченних елементів, зони руйнування, навантаження на кріплення, цілик

Purpose. To substantiate the rational parameters of the stability assuring measures provided for a skin-to-skin development heading being driven towards advancing mining face through determining the extension of breakage zone around the longwall, and the support pressure load by using the method of finite elements.

Methodology. The geomechanical conditions of rock massif and cross impact of the complex of development workings and mining have been considered based on the method of finite elements in three-dimension and flat task settings.

Findings. The solutions of the three-dimension and flat elastic-plastic problems allow to define the indices of stress concentration, the extent of breakage zone around working complex and support pressure load. This allows choosing required elements of the support.

Originality. It was determined that the width of the pillar between pair workings being equal to 3 meters is sufficient to provide required stability in regards to mining and geological conditions of the mine Dobropolskaya. It was determined that compression stress in the pillar from the side of coal-cutting working under the conditions of advancing face heading behind longwall opening reaches the value of $\sigma_y = 2,5 \gamma H$.

Practical value. The results of the research allowed us to determine optimal parameters for safety assuring measures provided for the air heading of the eighth northern longwall of the seam m_5^{16} on the level of 450 meters had been driven skin-to-skin in counter motion to the seventh northern conveyer heading. This allowed to provide the stability of this complex of development workings; and to apply the experience obtained for the conditions of PSP “ShU “Dobropolskoye”.

Keywords: mine section development, counter motion of mine workings, pair workings, method of finite elements, breakage zone, support pressure load, pillar

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук О.В. Солодянкіним. Дата надходження рукопису 27.05.13.