

*д.т.н. Должиков П.Н.,
Палейчук Н.Н.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫРАБОТОК В ЗОНАХ ИНТЕНСИВНОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Наведено результати чисельних досліджень по обґрунтуванню геометричних параметрів пластових підготовчих виробок Східного Донбасу в умовах інтенсивного тріщиноутворення. За допомогою метода скінчених елементів з трьох розглянутих форм поперечних перерізів обґрунтовано найбільш оптимальну форму перерізу пластової підготовчої виробки для розглянутих гірничо-геологічних умов - овоїд зі зміщеною відносно центру вертикальною віссю.

***Ключові слова:** виробки, поперечний переріз, метод скінчених елементів, оптимальна форма, напружено-деформований стан.*

Приведены результаты численных исследований по обоснованию геометрических параметров пластовых подготовительных выработок Восточного Донбасса в условиях интенсивного трещинообразования. При помощи метода конечных элементов из трех рассмотренных форм поперечных сечений обоснована наиболее оптимальная форма сечения пластовой подготовительной выработки для рассмотренных горно-геологических условий - овоид со смещенной относительно центра вертикальной осью.

***Ключевые слова:** выработки, поперечное сечение, метод конечных элементов, оптимальная форма, напряженно-деформированное состояние.*

Поддержание протяженных подготовительных выработок сталкивается с рядом трудностей, связанных с тем фактом, что в настоящее время разработка месторождений Восточного Донбасса ведется на больших глубинах. Хотя само понятие «большая глубина» является условным, большинство современных ученых сходятся в том, что на «большой глубине» наблюдаются новые формы проявления горного давления [1, 2, 4, 8]. Кроме того, наиболее распространенная форма поперечного сечения выработок – арочная, не является оптимальной в части восприятия асимметричных нагрузок со стороны кровли [2].

Анализ отечественных и зарубежных научных публикаций в области подземного строительства показал, что в настоящее время численных экспериментов с учетом геометрической неоднородности строения массива для наклонно залегающих пород не проводилось [1-7]. В связи с этим необходимо обосновать такие геометрические параметры выработок, при которых породные смещения будут иметь минимально возможные значения и распределяться симметрично по всему контуру выработки, что позволит сократить количество участков выработок, которые необходимо перекреплять вследствие несоответствия существующих типов поперечных сечений крепей направлению и величине преобладающей нагрузке.

Целью исследования является обоснование рациональных геометрических параметров выработок в интенсивно трещиноватых зонах глубоких антрацитовых шахт.

К **основной задаче** исследования относится подбор таких геометрических параметров выработки, в первую очередь формы поперечного сечения, при которых напряжения на контуре будут постоянны (в идеале – изолинии напряжений будут совпадать с контуром выработки)[1, 2]:

$$\sigma_z + \sigma_x = \sigma_\rho + \sigma_\theta = const, \quad (1)$$

где σ_z и σ_x – соответственно вертикальные и горизонтальные компоненты напряжений, заданные на бесконечности, МПа;

σ_ρ и σ_θ – радиальные и тангенциальные компоненты напряжений, МПа.

Для выполнения численного эксперимента использовался метод конечных элементов (далее МКЭ), который удачно реализован в программном комплексе «Лира», разработанном в ООО «Лира-софт» (г. Киев). Одним из основных преимуществ данного ПК является полная интеграция с программными продуктами AutoCAD® и Excel®, что существенно упрощает создание сетки КЭ и анализ результатов. К недостаткам следует отнести тот факт, что выполнение расчетов возможно только в упругой постановке [3].

Конечно-элементная модель является плоской. Проведение вычислительного эксперимента выполнено в упругой постановке, что снижает точность полученных результатов, однако позволяет определить основные тенденции изменения НДС и влияния на характер НДС выработки формы ее поперечного сечения.

При проведении эксперимента было рассмотрено две характерных геомеханических ситуации: на начальный момент времени, т.е. в

отсутствие зоны неупругих деформаций и при ее наличии. При этом ЗНД моделировалась заданием конечным элементам свойств полуразрушенной породы с соответствующим значением модуля упругости и коэффициента Пуассона.

Моделирование выполнялось для условий 18-го восточного откаточного штрека пласта h_{10} шахты «Партизанская» ГП «Антрацит» с целью последующего сравнения фактического состояния штрека с результатами численного эксперимента. При формировании КЭ-сетки учитывались реальные геометрические параметры породного массива в пределах исследуемой области, в первую очередь колебания мощности боковых пород, для чего на схеме расчетной области выбрано пять точек, в которых с точностью до $\pm 0,02$ м были известны значения мощностей литологических разностей. Мощность угольного пласта в пределах исследуемой области варьировалась незначительно (до $\pm 0,01$ м), поэтому, при моделировании, ее значение принималось постоянным и равным 1,15 м.

Для удобства формирования КЭ-сетки под мощностью на модели подразумевается вертикальный размер, а не истинный. Поскольку мощность пород в пределах модели значительным образом колеблется, то угол α брался по падению почвы угольного пласта и составлял 12° . Расчетная схема модели представлена на рисунке 1.

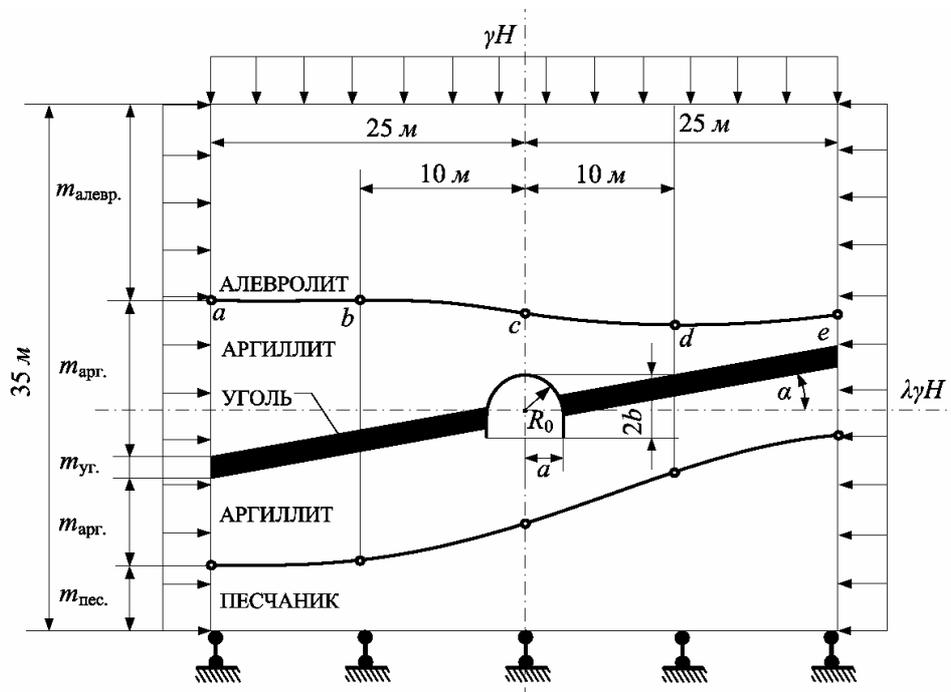


Рисунок 1 – Обобщенная расчетная схема

Размеры расчетной области составляют: длина (по горизонтальной оси x) – 50 м; высота (по вертикальной оси z) – 35 м. Количество конечных элементов модели – 7 250, количество узлов – 7 893, количество степеней свободы – 6.

Значения мощности слоев пород в соответствующих точках приведены в таблице 1. Физико-механические параметры пород, необходимые для выполнения численного моделирования приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Вариации значений мощности пород

Литологический тип пород	Значение мощности пород m (м) в соответствующих точках в пределах исследуемой области				
	a	b	c	d	e
Алевролит (песчаный сланец)	13,16	13,58	15,04	15,74	16,50
Аргиллит (глинистый сланец)	8,96	7,69	3,50	4,42	2,81
Уголь	1,15				
Аргиллит, почва	5,91	6,17	4,76	3,44	4,39
Песчаник	5,71	6,31	7,55	10,17	10,07

Таблица 2 – Физико-механические свойства материалов модели

Литологический тип пород	Плотность, ρ , т/м ³	Предел прочности		Модуль упругости, E , ГПа	Коэффициент Пуассона, μ
		$\sigma_{сж.}$, МПа	σ_p , МПа		
Алевролит	2,60	97,0	9,2	14,0	0,22
Аргиллит	2,53	62,5	5,1	9,7	0,25
Уголь	1,80	25,3	3,6	5,2	0,30
Аргиллит	2,53	58,7	5,2	9,5	0,26
Песчаник	2,66	160,0	12,6	17,4	0,17
Полуразрушенная порода	2,00	20,0	1,0	2,0	0,45

После создания геометрии конечно-элементной модели на нее налагались граничные условия, которые наиболее адекватно отражают работу системы «массив – горная выработка». Размеры конечного элемента в модели колеблются в пределах от 0,3×0,4 м до 0,5×0,5 м, что для модели таких размеров достаточно, чтобы сходимость решения и точность результатов были приемлемыми [4].

Верх модели нагружен равномерно распределенной нагрузкой и свободен от запрета деформаций. На левой плоскости деформации запрещены, кроме слоя алевролита (кровля) и угольного пласта, т.к. слева находится выработанное пространство лавы; на правой плоскости – также запрет деформаций, кроме слоя алевролита в кровле выработки и угольного пласта, который остается свободным от граничных условий.

На нижней плоскости модели запрещены деформации по горизонтальной и вертикальной осям. В расчетную схему включены следующие типы элементов: 224 и 227 – физически нелинейные универсальные, соответственно треугольный и четырехугольный КЭ плоской задачи (балка-стенка). При задании деформационных свойств конечных элементов пластинчатого типа, кроме статического модуля упругости, статического коэффициента Пуассона и плотности, задавалась толщина пластины, которая принята в данном исследовании равной ширине рамы крепления СВП-27, то есть 149,5 мм (в модели – 150,0 мм). Таким образом, после задания модели деформационных свойств получена карта жесткостей, соответствующих породам с учетом их состояния.

После операций по присвоению модели деформационных характеристик, к ней прикладывалась нагрузка в виде веса массива налегающих пород. Вертикальное давление массива пород σ_z определялось в соответствии с формулой

$$\sigma_z = \gamma H, \quad \sigma_x = \lambda \gamma H, \quad (2)$$

где γ – удельный вес пород, МН/м³;

H – глубина расположения выработки, м;

λ – коэффициент бокового распора.

Боковое давление определялось также в соответствии с формулой (2) при коэффициенте бокового распора λ равном 0,5.

Для численного эксперимента было рассмотрено три варианта формы поперечного сечения: арочная исходная, овоидная (усеченный эллипс) с соотношением горизонтального радиуса к вертикальному равному 0,55 и овоидная со смещенной вертикальной осью на 0,5 м от центра (по почве) с соотношением радиусов равным 0,55. Выбор такой конфигурации обусловлен результатами анализа отечественных и зарубежных исследований в области оптимизации формы поперечного сечения выработок [1, 2], согласно которому замена арочной формы эллипсоидной позволит оптимизировать НДС на контуре, тем самым обеспечив более длительное сохранение заданных размеров

выработки, а также с позиций соблюдения требований ПБ к минимальным площадям поперечных сечений горизонтальных и наклонных выработок в свету, ширине проходов для людей и величине зазоров между крепью, оборудованием или трубопроводами и наиболее выступающей кромкой габарита подвижного состава.

Поскольку в рамках одной статьи невозможно рассмотреть все полученные результаты, проанализируем характер распределения изополей главных напряжений σ_1 в различных геомеханических ситуациях (выбор для последующего анализа напряжений σ_1 обусловлен тем, что колебания изополей σ_3 для рассматриваемых условий незначительно, а максимальные колебания наблюдались именно в изополях σ_1). Результаты численных экспериментов представлены на рисунках 2-4.

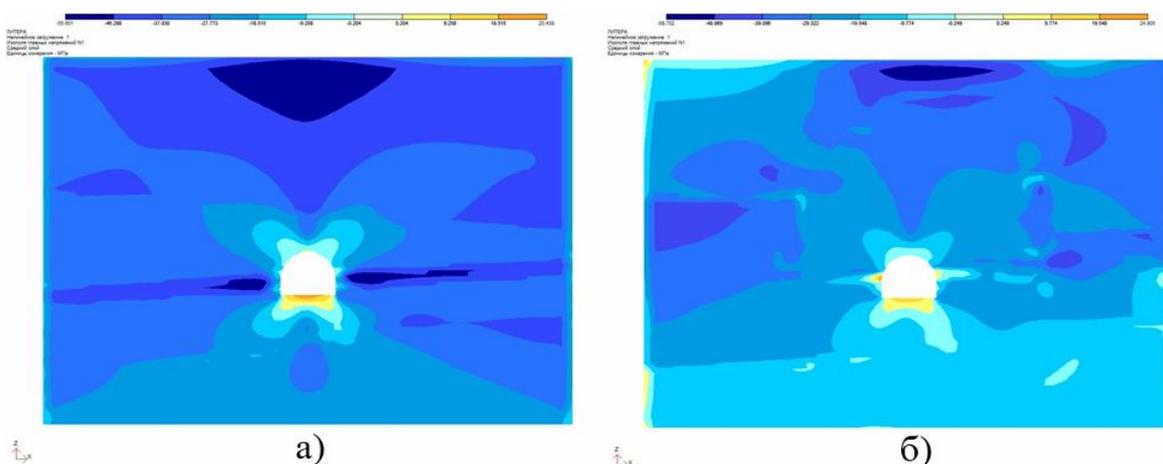


Рисунок 2 – Распределение изополей главных напряжений σ_1 при арочной форме поперечного сечения штрека: *а* – без учета ЗНД, *б* – с учетом ЗНД

Характер распределения главных напряжений σ_1 и σ_3 для всех рассматриваемых форм поперечных сечений в отсутствии ЗНД является классическим: концентрация сжимающих напряжений σ_1 в боках выработки, растягивающих – в почве; сжимающие напряжения σ_3 имеют максимальные значения в боках выработки, достигая максимальных значений в месте вдавливания стоек крепи в почву, что показывает на соответствие модели существующим положениям МГДТ и механики сплошной среды [5, 6]. Главные напряжения рассчитывались в соответствии с теорией Кулона-Мора [7].

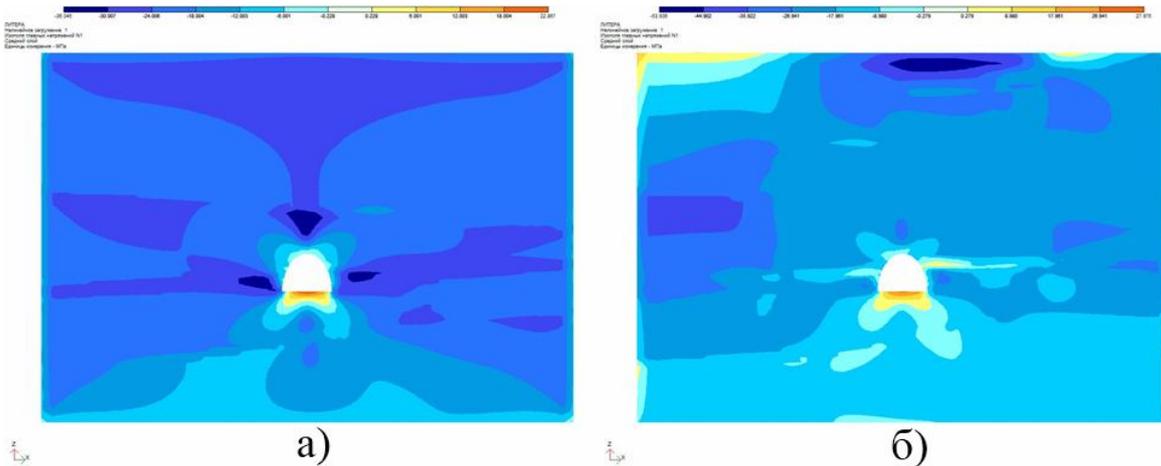


Рисунок 3 – Распределение изополей главных напряжений σ_1 при овоидной форме поперечного сечения штрека: *а* – без учета ЗНД, *б* – с учетом ЗНД

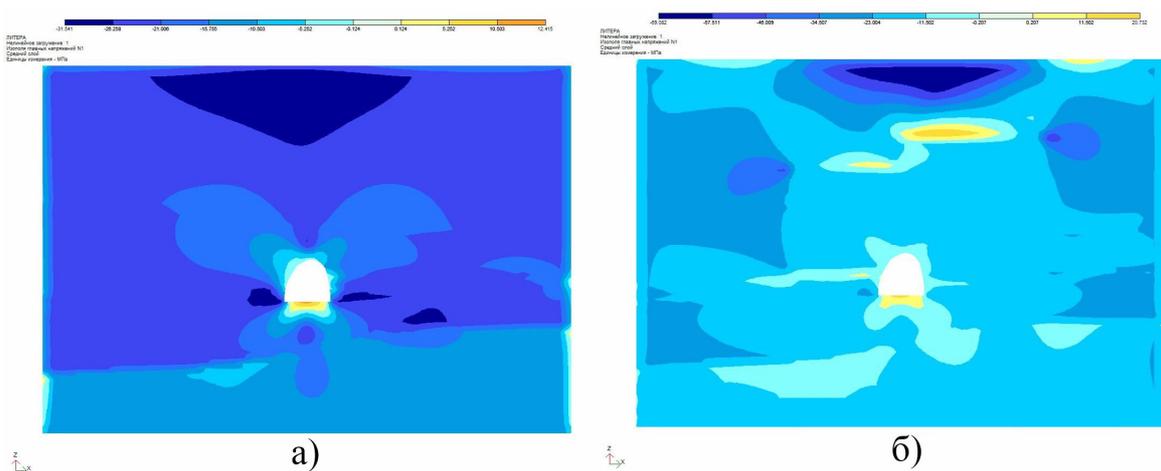


Рисунок 4 – Распределение изополей главных напряжений σ_1 при асимметричной овоидной форме поперечного сечения штрека: *а* – без учета ЗНД, *б* – с учетом ЗНД

В результате анализа результатов расчетов было установлено, что для условий 18-го восточного откаточного штрека пласта h_{10} шахты «Партизанская» с учетом развития во времени ЗНД с позиции оптимизации НДС на контуре выработки наиболее оптимальной является форма поперечного сечения в виде асимметричного овоида, т. к. при данной форме напряжения на контуре практически постоянны.

Менее оптимальной является овоидная форма, поскольку различие в значениях напряжений на контуре, без учета растягивающих напряжений в почве, достигает 8-12%, однако и она в данном случае оказывается более предпочтительной, чем арочная.

Менее всего к НДС в рассматриваемых ГГУ адаптирована арочная форма, поскольку ее параметры не позволяют добиться постоянства напряжений хотя бы в знаке. Так, даже в отсутствии ЗНД в боках наблюдаются значительные сжимающие главные усилия (как σ_1 , так и σ_3), в почве усилия σ_1 меняют знак: появляются значительные растягивающие напряжения, достигающие 40-60% по абсолютному значению от сжимающих напряжений в боках, а при учете ЗНД на некоторых участках контура в кровле угольного пласта также появляются растягивающие напряжения σ_1 .

К одному из основных недостатков визуализации результатов расчетов НДС в ПК «Ли́ра» является, на наш взгляд, недостаточное количество цветов (а именно – 6) для отображения изополей напряжений, поскольку при наличии напряжений противоположного знака анализ представленных результатов довольно затруднителен, т. к. шаг напряжений в изополях может достигать 30-40 МПа. Этот недостаток устранялся путем использования эпюр в соответствующих областях (кнопка на панели инструментов «эпюра по разрезу»). Анализ эпюр напряжений также показал соответствие полученных результатов аналитическим положениям механики сплошной среды и МТДТ.

Представляет несомненный интерес сравнение величин и знаков породных смещений в различных ситуациях. Хотя многие исследователи [2, 3, 4, 6] относят к недостаткам МКЭ неточность в визуализации изополей смещений, качественно (но отнюдь не количественно) оценить наиболее характерные вектора смещений при помощи МКЭ все-таки можно. Выполним сравнительный анализ характера породных смещений в кровле выработки, т. к. в натуральных условиях именно смещения пород кровли являются максимальными. Эпюры горизонтальных перемещений пород в кровле выработки с учетом образования ЗНД представлены на рисунке 5.

Как следует из эпюр, наибольшая асимметрия наблюдается в выработке с арочной формой поперечного сечения (рисунок 5, а). Хотя физически такое распределение встречается довольно редко (исходя из эпюры, породы кровли левой и правой сторон от вертикальной оси выработки смещаются влево), оно соответствует гипотезам смещений пород в условиях геометрической неоднородности строения горного массива [4, 7], согласно которым смещения со стороны с минимальным значением мощности первого породного слоя кровли будут максимальными. Это подтверждается и результатами натуральных исследований (рисунок 6).

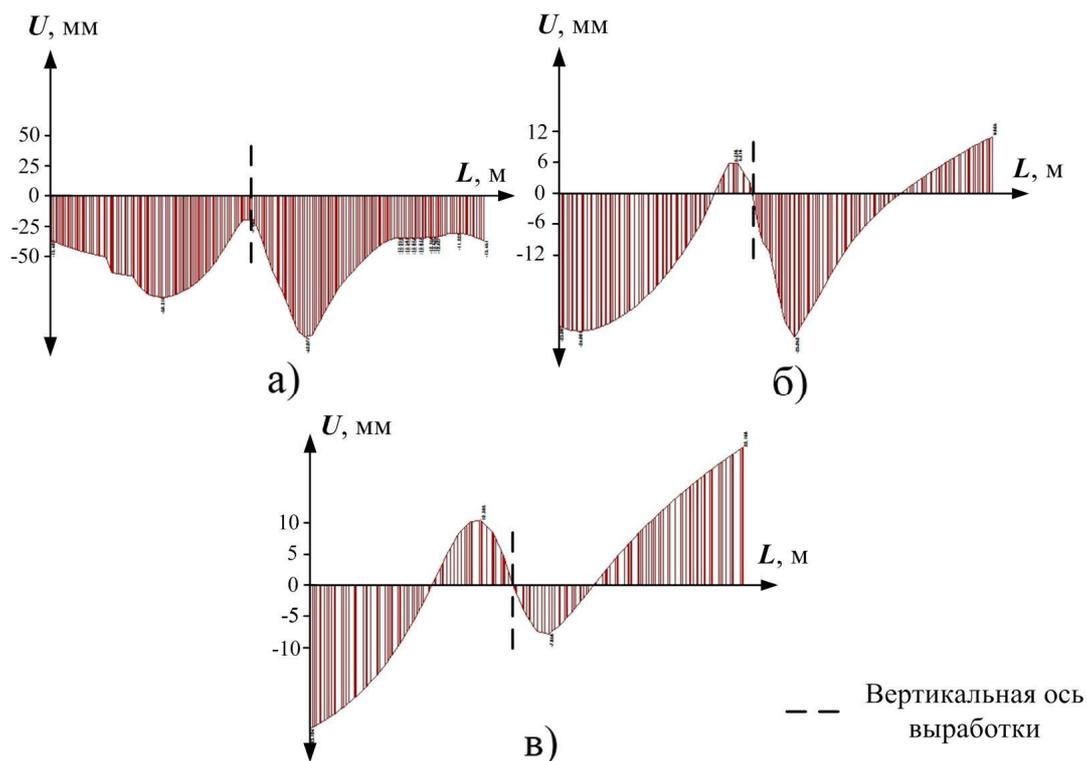


Рисунок 5 – Эпюры горизонтальных перемещений пород в кровле выработки с учетом образования ЗНД: *а* – выработка арочной формы, *б* – овоид, *в* – выработка формы асимметричного овоида



Рисунок 6 – Характер деформирования 18-го восточного откаточного штрека пласта h_{10} шахты «Партизанская»

При использовании овоидной формы поперечного сечения наблюдается некоторая, весьма малая доля симметрии области горизон-

тальных смещений пород кровли, в связи с чем можно полагать, что при использовании этого типа поперечного сечения породные смещения будут менее асимметричны, чем при арочной.

При использовании формы поперечного сечения выработки в виде неправильного овоида со смещенной вертикальной осью горизонтальные и вертикальные смещения пород кровли практически симметричны относительно вертикальной оси выработки. Данный факт говорит о том, что эта форма поперечного сечения является наиболее оптимальной в рассмотренных горно-геологических условиях.

Выводы

1. В результате как натуральных, так и численных экспериментов с использованием МКЭ было установлено, что для рассматриваемых условий из всех типов поперечных сечений, рассмотренных в исследовании к асимметричным нагрузкам со стороны кровли менее всего адаптирована арочная форма: ее большой пролет в верхней части не способен скомпенсировать асимметрию в смещениях даже частично. В натуральных условиях это приводит к фрагментации профиля СВП в области замковых соединений одной из стоек (со стороны меньших по модулю численных значений смещений пород кровли) и излому другой.

2. При помощи МКЭ для рассматриваемых горно-геологических условий получена оптимальная форма поперечного сечения выработки – овоид с соотношением горизонтального радиуса к вертикальному равным 0,55 и величиной смещения вертикальной оси овоида вправо от центра равной 0,5 м.

Библиографический список

1. Литвинский Г. Г. Основные закономерности проявлений горного давления на «малых» и «больших» глубинах / Г.Г. Литвинский // Форум горняков – 2009: междунар. конф., 30 сент. – 3 окт. 2009 г. Национальный горный ун-т. – Д., 2009. – С. 13-21.

2. Булычев И.Н. К вопросу оптимизации контуров поперечных сечений протяженных горизонтальных выработок / И.Н. Булычев // Известия Тульского государственного университета: (серия: Геомеханика. Механика подземных сооружений). – 2004. – Вып. 2. – С.62-67.

3. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. –221 с.

4. Кожушок О. Д. Напряженно-деформированное состояние в приконтурной зоне подготовительной выработки при возведении двойной литой полосы в выработанном пространстве/О. Д. Кожушок //Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов / Ин-т геотехни-

ческой механики им. Н. С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2005. – Вып. 78. – С.10-17.

5. Работнов Ю. Н. Механика твердого деформируемого тела: учеб. для ВУЗов. – 2-е изд., испр. / Ю. Н. Работнов. – М. : Наука. Гл. редакц. физ.-мат. лит., 1988. – 712 с.

6. Бабкин А.В. Основы механики сплошных сред: учебник для ВТУЗов. – 2-е изд., испр. / А. В. Бабкин, В. В. Селиванов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 376 с.

7. Литвинский Г. Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов: монография / Г. Г. Литвинский. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 207 с.

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Гайко Г.И.