

УДК 622.831

**О РАСЧЕТЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КРЕПИ
И ПРИКОНТУРНЫХ ПОРОД ПРИ ПОЭТАПНОЙ РАЗРАБОТКЕ
ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРОТЯЖЕННОЙ ВЫРАБОТКИ**

В. М. Серяков

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: vser@misd.nsc.ru,
Красный проспект, 54, 630091, Новосибирск, Россия*

Рассматриваются вопросы расчета напряженно-деформированного состояния элементов крепи и массива горных пород при поэтапной разработке (раскрытии) поперечного сечения выработки. Учет последовательности горных работ и возведения крепи приводит к необходимости решения ряда задач о дополнительных полях напряжений, вызванных проходкой выработок малых сечений. Для определения геомеханического состояния крепи и горных пород применен метод расчета, основанный на однократном формировании матрицы жесткости расчетной системы, отвечающей исходному массиву до начала горных работ. Процесс последовательного образования выработок и изменение механических свойств расчетной системы осуществляются с помощью процедуры начальных напряжений.

Проведен расчет двух вариантов развития горных работ при поэтапной разработке поперечного сечения выработки в условиях упругого деформирования массива и крепи, рассмотрен характер перераспределения полей напряжений в элементах крепи при ее последовательном сооружении. Показано, что последовательность горных работ оказывает существенное влияние на значения напряжений в элементах крепи при завершении походки выработки. Вариант ведения горных работ с начальным формированием боковых элементов крепи приводит к большим значениям растягивающих напряжений в крепи по сравнению с вариантом первичной отработки подсвдогового пространства.

Горные породы, напряжения, деформации, поперечное сечение выработки, элементы крепи, этапы разработки сечения, расчет напряженного состояния, матрица жесткости, зоны растяжения

Разработка поперечных сечений выработок больших объемов (в технической литературе — раскрытие) происходит в несколько этапов. Широкое распространение получили следующие схемы отработки: поэтапное раскрытие всего сечения выработки начиная со свода, горизонтальными уступами; создание по контуру выработки, начиная со стен, выработок небольших размеров с одновременным формированием в них элементов крепи и последующей отработкой подсвдогового сечения основной выработки; поэтапное раскрытие сечения отдельными выработками небольших сечений [1].

Выработки больших поперечных сечений, как правило, создаются при строительстве подземных сооружений камерного типа и предназначаются для размещения важного технологического оборудования или объектов, рассчитанных на длительный период работы. В таких усло-

виях особое значение уделяется оценке напряженно-деформированного состояния элементов крепи и окружающего массива с целью сохранения устойчивости создаваемого подземного сооружения [2, 3].

Последовательность работ по поэтапному раскрытию сечения выработки и возведению в ней элементов крепи оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние подземного сооружения [4]. Учитывая повышенные требования к обеспечению его безопасной работы, оценка влияния последовательности горных работ на геомеханическое состояние крепи и окружающего массива является важным элементом этого процесса.

Определению напряженного состояния крепи и приконтурного массива посвящено много работ [1 – 7], наиболее полное представление о них можно найти в монографии [3]. В большинстве работ материал крепи и окружающий массив представляются упругими изотропными материалами, предполагается, что раскрытие поперечного сечения выработки и установка в ней крепи осуществляются за один этап. Если принять предположение об упругом деформировании крепи и породного массива, то определение напряженно-деформированного состояния массива и крепи при поэтапной разработке поперечного сечения выработки можно свести к решению ряда задач теории упругости о нахождении дополнительных полей напряжений, соответствующих каждому этапу данного процесса [8].

МЕТОД РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КРЕПИ И ОКРУЖАЮЩЕГО МАССИВА ПРИ ПОЭТАПНОМ РАСКРЫТИИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ВЫРАБОТКИ

В ИГД СО РАН разработаны практические методы решения таких задач [9, 10]. Отметим некоторые основные моменты их реализации. Процесс поэтапного раскрытия поперечного сечения выработки большого сечения состоит из последовательности выполнения операций “образование выработки – возведение в ней элемента крепи”. Существенной особенностью процесса является изменение после каждого этапа раскрытия конфигурации поперечного сечения выработки, что при математическом описании механического состояния деформируемой среды может быть учтено решением ряда задач в дополнительных напряжениях. Краевые условия для этих задач следуют из условия отсутствия на границах вновь образуемых выработок внешних усилий. Например, при образовании в исходном массиве первой выработки на ее границе нормальные и касательные напряжения будут равны и противоположны по знаку нормальным и касательным напряжениям, действующим на этой границе в исходном напряженном состоянии S_0 .

После определения дополнительного поля напряжений S_1 , вызванного проведением первой выработки, полные напряжения S в массиве горных пород записываются как $S = S_0 + S_1$. Следующий этап решения состоит в определении дополнительного поля напряжений S_2 , вызванного проведением второй выработки. При этом нормальные и касательные напряжения на ее границе будут равны и противоположны по знаку нормальным и касательным напряжениям, действующим на этой границе для напряженного состояния S .

После этого этапа решения в массиве горных пород полные напряжения S определяются как сумма $S_0 + S_1 + S_2$, а в элементах крепи, возведенных в первой выработке, $S = S_2$.

Аналогично в результате проведения третьей выработки в массиве горных пород будут действовать напряжения $S = S_0 + S_1 + S_2 + S_3$, в элементах крепи, расположенных в первой выработке, $S = S_2 + S_3$, а в элементах крепи, возведенных во второй выработке, $S = S_3$. Указанный алгоритм распространяется на любое количество выработок.

При использовании изложенного подхода необходимо выделение контура вновь создаваемой выработки и вычисление действующих на нем компонент поля напряжений. Реализация такого алгоритма, во-первых, связана с большими техническими трудностями, обусловленными заданием контуров последовательно создаваемых выработок и вычислением на них узловых сил. Во-вторых, при численном решении требуется аппроксимация нормальных и касательных компонент напряжений на границах последовательно создаваемых выработок между точками расчетной сетки. Как показывают расчеты, применение любой аппроксимации напряжений между узлами расчетной сетки быстро приводит к накоплению ошибок и к невозможности продолжения процесса расчета.

В качестве метода, позволяющего преодолеть возникающие трудности, предложен следующий. Вся расчетная область, включая и подобласти размещения выработок, разбивается на конечные элементы. Механические свойства элементов, расположенных в выработках, полагаются теми же, что и были здесь до их образования, т. е. расчетная область моделирует нетронутый массив горных пород. Условие, которое отражает факт образования некоторой выработки, — обращение в соответствующих данной выработке элементах в ноль всех компонент тензора напряжений. Для его выполнения предлагается использовать итерационный метод начальных напряжений [11].

Начальные узловые силы добавляются к граничным и объемным силам исходной задачи, по ним определяется новое напряженно-деформированное состояние расчетной области. Итерационный процесс повторяется до тех пор, пока разность вычисленных на n -й итерации напряжений и накопленных начальных напряжений в каждом элементе выработки не станет меньше заданного малого числа.

Необходимо отметить, что материал крепи имеет физико-механические характеристики, отличные от свойств массива горных пород, и при моделировании последовательности раскрытия поперечного сечения выработки это приводит к потере главного преимущества разработанного метода, состоящего в неизменяемости матрицы жесткости. Для избежания этого разработан алгоритм учета последовательности отработки, в котором при любых механических свойствах крепи используется одна и та же матрица жесткости расчетной системы. Итерационный процесс нахождения решения строится следующим образом. Деформации в конечных элементах, моделирующих материал крепи, рассчитанные с помощью матрицы жесткости, соответствующей исходному массиву горных пород, полагаются истинными. По закону Гука определяются напряжения S^* , которые должны были действовать в элементах крепи, если бы имели механические свойства исходного массива.

Разности напряжений S^* и S , где S , полученные с использованием неизменяемой матрицы жесткости, рассматриваются как начальные напряжения. Далее применяется алгоритм метода начальных напряжений. Вектор начальных узловых сил добавляется к вектору внешних нагрузок. Определяется новое деформированное состояние массива горных пород. Полагая, что вновь полученные деформации верны, описанная выше процедура повторяется. Тестовые расчеты показали быструю сходимость метода и возможность получения с его помощью решения различных задач механики горных пород [10].

Изложенные постановки краевых задач механики горных пород и методы их решения применены для определения напряженно-деформированного состояния крепи и окружающего выработку массива для двух вариантов раскрытия поперечного сечения протяженной выработки больших размеров. Последовательность ведения горных работ для каждого варианта показана на рис. 1.

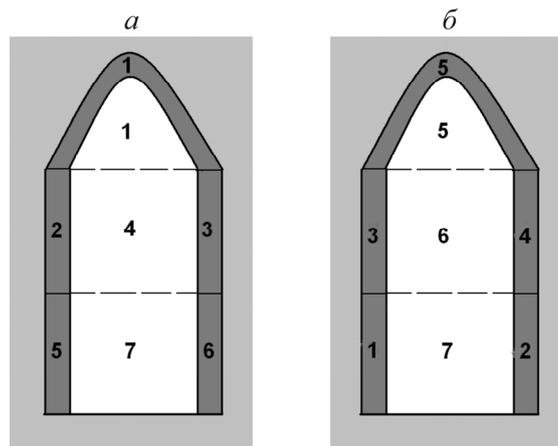


Рис. 1. Последовательность раскрытия поперечного сечения выработки и возведения в ней элементов крепи для двух вариантов ведения горных работ: *а* — с первичной отработкой подсводовой части сечения; *б* — с первичным возведением крепи в бортах выработки

Расчеты выполнены для условий плоской деформации. На вертикальных границах расчетной области заданы нулевые значения горизонтальной компоненты вектора смещений u и касательной компоненты тензора напряжений τ_{xy} . Эти условия отвечают исходному напряженному состоянию массива с компонентами тензора напряжений: $\sigma_y^0 = -\rho H$; $\sigma_x^0 = -\nu \rho H / (1 - \nu)$; $\tau_{xy}^0 = 0$ и реализуются в регионах, где отсутствует тектоника [8]. Здесь σ_x^0 , σ_y^0 , τ_{xy}^0 — нормальные и касательная компоненты тензора напряжений; ρ — объемный вес пород; ν — коэффициент Пуассона породного массива; H — расстояние до земной поверхности. Ось Ox направлена по горизонтали, Oy — по вертикали. Верхняя граница расчетной области свободна от действия внешней нагрузки. На нижней границе полагались нулевыми вертикальная компонента вектора смещений v и касательная компонента тензора напряжений τ_{xy} . Механические свойства массива горных пород приняты следующими: модуль Юнга $E = 25$ ГПа; $\nu = 0.25$. Для материала крепи $E = 27$ ГПа; $\nu = 0.2$. Объемный вес пород и материала крепи равен 0.03 МН/м³.

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИКОНТУРНОГО МАССИВА И ФОРМИРУЕМОЙ КРЕПИ ДЛЯ ВАРИАНТА С ПЕРВИЧНОЙ ОТРАБОТКОЙ ПОДСВОДОВОЙ ЧАСТИ ВЫРАБОТКИ

Рассмотрим процесс изменения напряженного состояния крепи и окружающего массива в ходе реализации этапов последовательного возведения крепи. На рис. 2 для первого варианта отработки приведено распределение в окрестности выработки главных напряжений σ_1 и σ_2 , отвечающих решению поставленной задачи после окончания первого этапа горных работ. Их рассмотрение позволяет установить области действия растягивающих и сжимающих напряжений в крепи и окружающем массиве и оценить размеры этих областей. Области растяжения важны для оценки возможного разрушения как крепи, так и приконтурного массива. Это связано с тем, что пределы прочности горных пород материала крепи на растяжение на порядок ниже, чем на сжатие или сдвиг [12].

Распределение напряжений, приведенное на рис. 2, соответствует характеру напряженного состояния упругой сплошной среды в окрестности выработок. В почве образуется обширная область растягивающих напряжений σ_1 , зоны опорного давления формируются у боковых границ свода (рис. 2б).

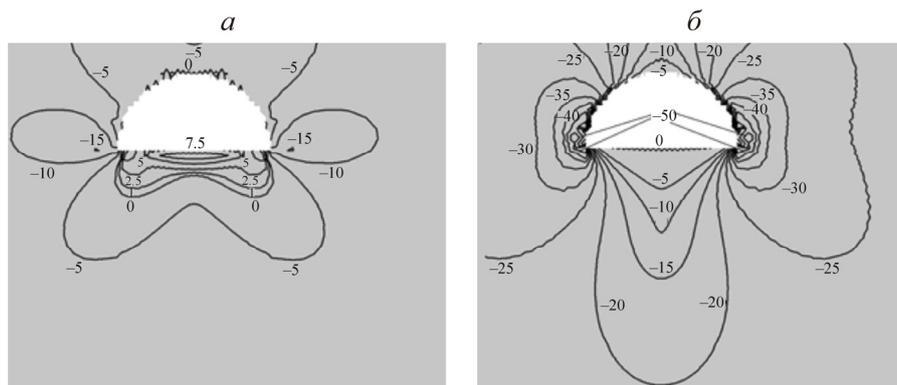


Рис. 2. Характер распределения главных напряжений σ_1 (а) и σ_2 (б) в породном массиве после первого этапа раскрытия поперечного сечения выработки большого сечения

На втором этапе горных работ начинается возведение вертикальных элементов крепи, для чего образуется вторая выработка (рис. 3а, б). При проходке этой выработки кроме окружающего массива деформируется и подсводная часть крепи, которая в этот момент уже возведена в первой выработке. Напряжения в ней пока незначительны, обращает на себя внимание лишь область концентрации растягивающих напряжений, в которой их значения достигают 5 МПа (рис. 3а).

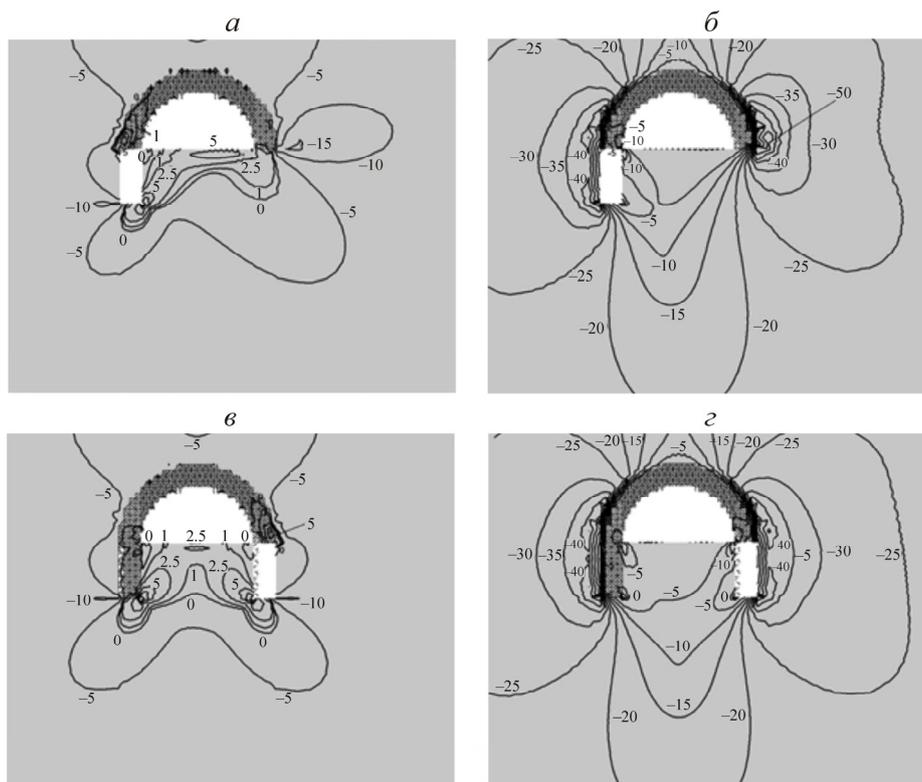


Рис. 3. Распределение нормальных напряжений σ_1 (а, в) и σ_2 (б, г) в элементах крепи и окружающем массиве после второго (а, б) и третьего (в, г) этапа ведения горных работ по формированию выработки большого сечения

На третьем этапе последовательного образования выработок малых сечений деформируется и вертикальный элемент крепи, размещенный в выработке, пройденной на втором этапе (рис. 3в, г). Продолжается процесс перераспределения напряжений в окружающем массиве.

На следующем этапе горных работ извлекаются породы, расположенные между сформировавшимися частями вертикальных секций крепи (рис. 4). Приведены картины распределения напряжений в сформировавшейся на этот момент времени части крепи. Уровень напряжений в крепи не высок. Обращают на себя внимание области растягивающих напряжений (рис. 4а), их максимальные значения чуть выше 1 МПа.

Изменения напряженного состояния в крепи и приконтурном массиве после пятого и шестого этапов раскрытия сечения выработки аналогичны рассмотренным выше особенностям полей напряжений в результате выполнения третьего и четвертого этапов отработки.

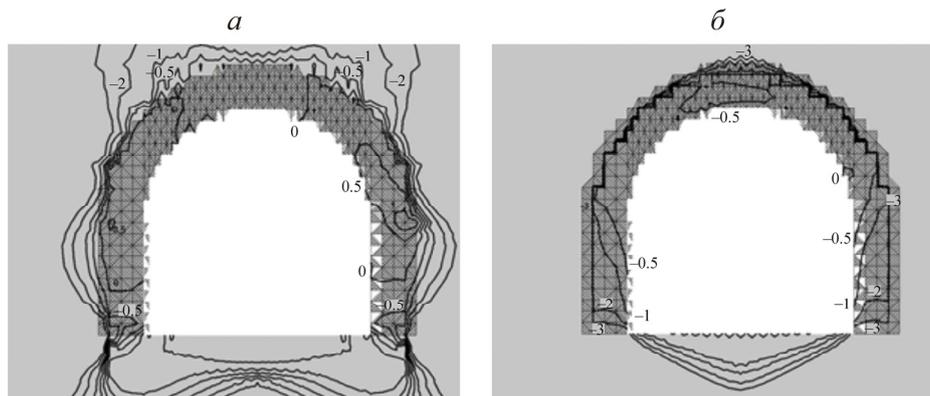


Рис. 4. Характер распределения напряжений в элементах крепи после завершения пятого этапа формирования выработки большого сечения: σ_1 (а) и σ_2 (б)

Окончательная картина распределения напряжений после завершения всех этапов раскрытия поперечного сечения выработки приведена на рис. 5. Элементы крепи находятся преимущественно под действием небольших сжимающих напряжений. Небольшие области растяжения по компоненте σ_1 образуются в верхних вертикальных элементах крепи, значения напряжений чуть выше 1 МПа.

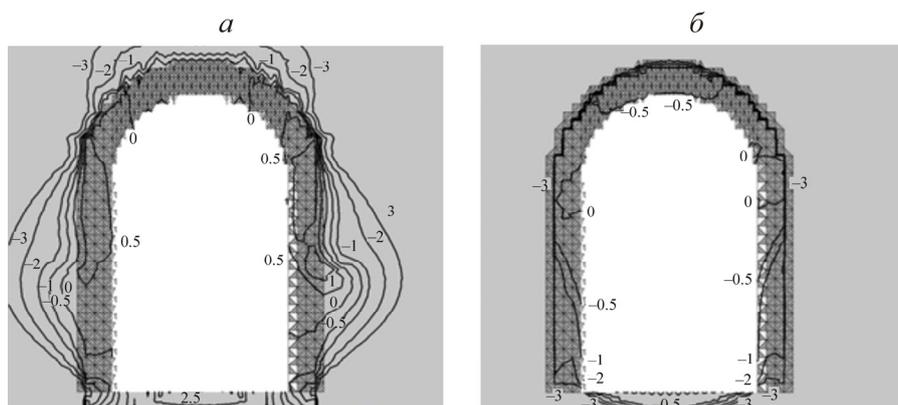


Рис. 5. Распределение напряжений в элементах крепи после завершения работ по раскрытию поперечного сечения выработки: σ_1 (а) и σ_2 (б)

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В КРЕПИ ПРИ ПЕРВОНАЧАЛЬНОМ ФОРМИРОВАНИИ ЕЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Раскрытие поперечного сечения выработки во втором варианте ведения горных работ начинается с формирования вертикальных элементов крепи. Во многом характер перераспределения напряжений массива в сформированных элементах крепи аналогичен таковому, полу-

ченному при обсуждении первого варианта. При рассмотрении второго варианта остановимся на наиболее существенных отличиях. На рис. 6 дано распределение напряжений в окрестности выработки после пятого этапа ведения горных работ.

Отметим прежде всего значительные области концентрации растягивающих напряжений в сформированных элементах крепи. Их значения превышают 10 МПа (рис. 7а). В элементах крепи формируются также зоны сжатия, но значения напряжений в них меньше, чем значения растягивающих напряжений.

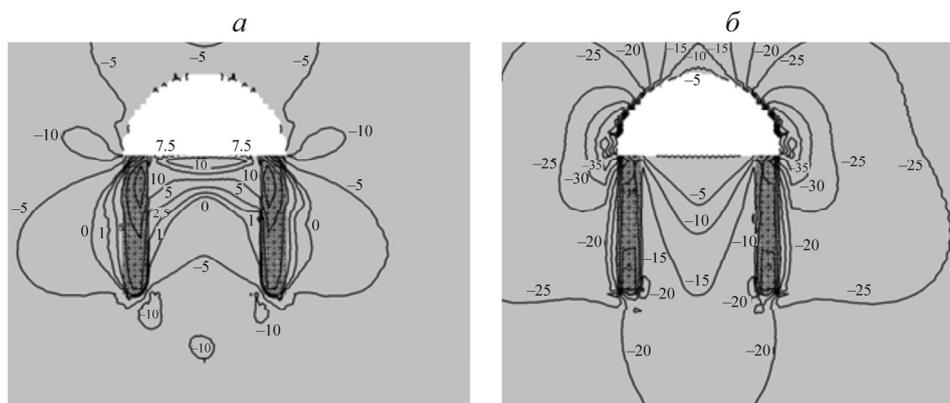


Рис. 6. Характер распределения полей напряжений после выполнения пятого этапа раскрытия поперечного сечения выработки: σ_1 (а) и σ_2 (б)

При дальнейшем ведении горных работ и возведении элементов крепи напряжения σ_1 в зонах растяжения уменьшаются и после завершения всех этапов раскрытия поперечного сечения максимальные их значения чуть выше 2.5 МПа (рис. 7). Анализ распределения напряжений в крепи выработки показывает: при последовательности работ по раскрытию поперечного сечения выработки с первоначальным формированием вертикальных элементов крепи после завершения горных работ практически во всем ее объеме возникает область растяжения.

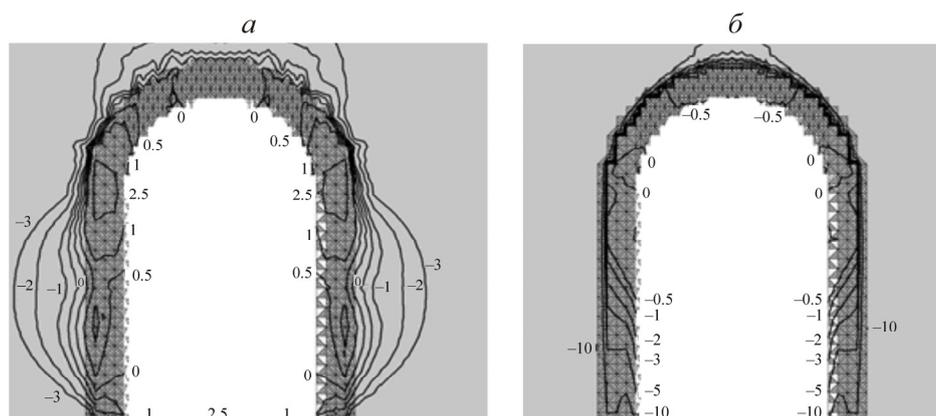


Рис. 7. Распределение напряжений в крепи после завершения работ по раскрытию поперечного сечения выработки: σ_1 (а) и σ_2 (б)

ВЫВОДЫ

Предложен метод расчета напряженно-деформированного состояния крепи и приконтурных пород при поэтапном раскрытии поперечного сечения выработки.

Установлено, что при поэтапном возведении элементов крепи в их объеме формируются зоны растягивающих напряжений, которые достигают пределов прочности материала крепи на промежуточных этапах ведения горных работ.

Теоретически показано, что последовательность раскрытия поперечного сечения оказывает значительное влияние на напряженное состояние крепи.

Вариант ведения горных работ с начальным формированием вертикальных элементов крепи приводит к значительно большим напряжениям растяжения в крепи по сравнению с вариантом первичной отработки подсводового пространства. При глубине заложения выработки 750 м для варианта с начальным формированием вертикальных элементов крепи напряжения растяжения достигают 10 МПа, в то время как при реализации второго варианта они не превышают 4 МПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Картозия Б. А., Федунец Б. И., Шуплик М. Н. и др. Шахтное и подземное строительство: учебник для вузов. Т. 2. — М.: Горная книга, 2003.
2. Булычёв Н. С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах. — М.: Недра, 1989.
3. Булычёв Н. С. Механика подземных сооружений. — М.: Недра, 1994.
4. Протосеня А. Г., Долгий И. Е., Огородников Ю. Н. Шахтное и подземное строительство в примерах и задачах. — СПб.: Изд-во Горного ин-та им. Плеханова, 2003.
5. Булычёв Н. С., Фотиева Н. Н., Стрельцов Е. В. Проектирование и расчет крепи капитальных горных выработок. — М.: Недра, 1986.
6. Баклашов И. В., Картозия Б. А. Механика подземных сооружений и конструкций крепей. — М.: Недра, 1992.
7. Насонов И. Д., Федюкин В. А., Шуплик М. Н. Технология строительства подземных сооружений. — М.: Недра, 1992.
8. Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А. Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005.
9. Баймбетов М. О., Серяков В. М. Влияние порядка ведения очистных и закладочных работ на напряженно-деформированное состояние месторождений // ФТПРПИ. — 1984. — № 4.
10. Серяков В. М. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород при применении технологии с закладкой выработанного пространства // ФТПРПИ. — 2014. — № 5.
11. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975.
12. Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В. Основы механики горных пород. — Л.: Недра, 1989.

Поступила в редакцию 15/VI 2015