УДК 622.273.2:622.831

А.П.ГОСПОДАРИКОВ
Факультет фундаментальных и гуманитарных дисциплин, профессор кафедры высшей математики
Л.А.БЕСПАЛОВ
Горный факультет, группа ТПМ-01, ассистент профессора
М.А.ЗАЦЕПИН
Горный факультет, группа ТПМ-00, ассистент профессора

ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КРОВЛИ СОЛЯНЫХ ПЛАСТОВ С УЧЕТОМ ОПТИМАЛЬНОГО ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ

Проектирование и строительство подземных горных выработок, добыча полезных ископаемых, сооружение подземных объектов на больших глубинах и в сложных горно-геологических условиях тесно связаны с анализом напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов горных пород. Для определения НДС массива в горной геомеханике используют данные инженерной геологии и геофизики, применяются результаты экспериментальных исследований, а также различные аналитические и численные методы механики сплошных (дискретных) сред.

Design and construction of mines, mining operations and construction underground buildings at great depth under different types of mining and geological conditions are complicated processes. These processes associated with analyze of parameters stress and strain state in excavations. There are many different methods for determine geomechanical parameters. Geological engineering, engineering physics, experimental investigation, continuum mechanics are the main methods for determining stress and strain state.

Старобинское месторождение калийных солей находится в эксплуатации с 1962 г. По своему строению оно представляет собой пологую (угол падения 1-3°) пластовую залежь, состоящую из четырех калийных горизонтов. Разрабатываемая часть пласта Третьего калийного горизонта (Третий пласт) залегает на глубине 400-900 м и состоит из трех сильвинитовых слоев мощностью 0,6-1,4 м каждый, разделенных прослоями каменной соли примерно такой же мощности.

Система разработки длинными столбами с обрушением и частичной закладкой (рис.1) позволяет уменьшить потери руды в недрах до 20 %, улучшить качество руды до содержания в ней 35-40 % KCl, что фактически приводит к снижению себестоимости продукции в целом.

Анализ произошедших динамических обрушений основной кровли за последние 20 лет показал, что подавляющее большинство (95 %) случаев происходит в полулаве со стороны массива. Так как разрушенного галита с учетом коэффициента разрыхления солей $K_р = 1{,}37$ недостаточно для полной закладки выработанного пространства (заполняется около 40 %), то возникает необходимость усовершенствования схемы расположения галита в выработанном пространстве.

Так, в работе [4] предложены мероприятия по ассиметричному размещению закладки с преимущественным ее размещением в полулаве со стороны массива (рис.2).

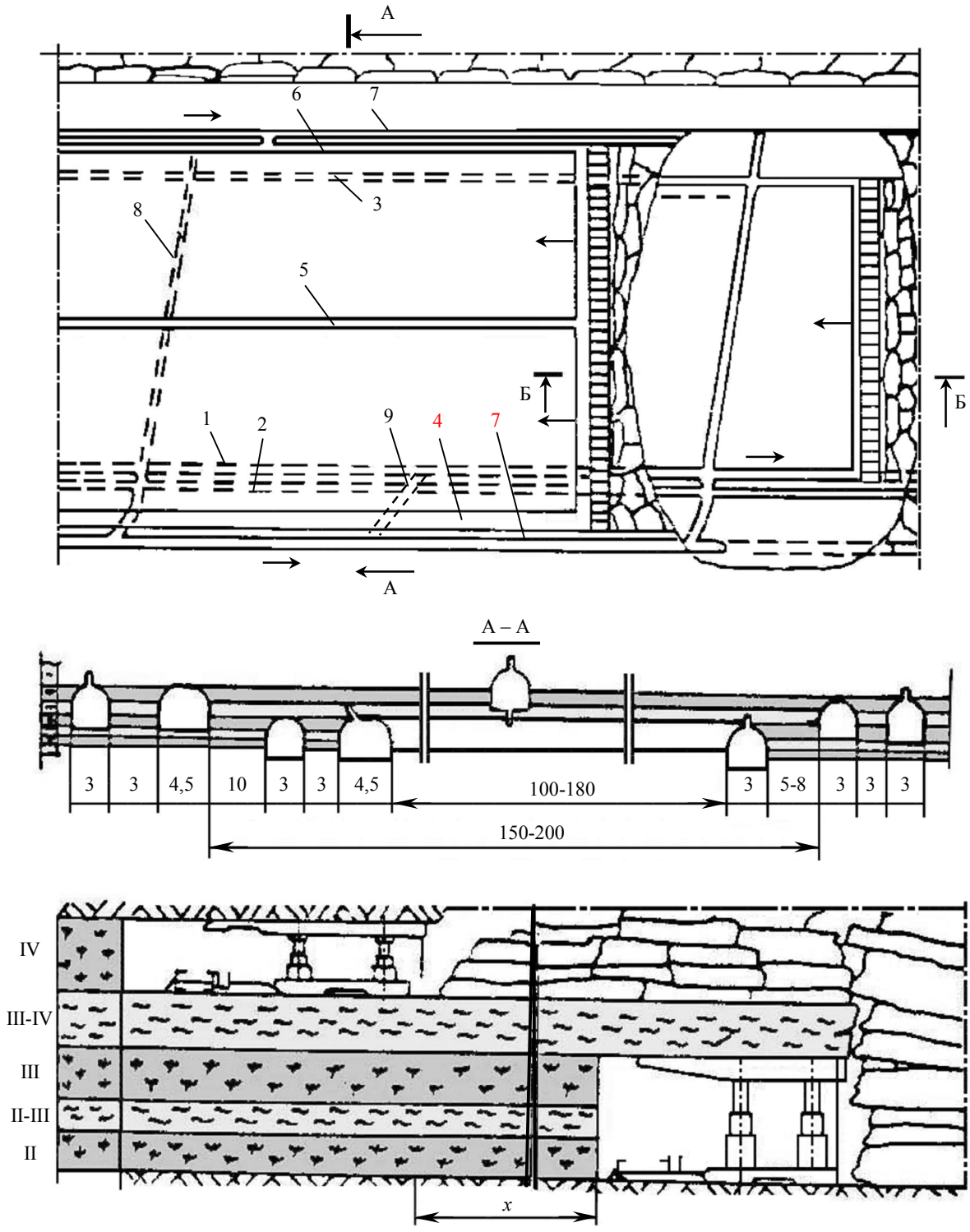


Рис.1. Типовая технологическая схема выемки Третьего пласта с разделением на слои и раздельной подготовкой слоевых лав

1 и 2 – конвейерный и транспортный панельные штреки соответственно; 3 – вентиляционный штрек нижней лавы; 4, 5 и 6 – конвейерный, вентиляционный и транспортный штреки верхней лавы; 7 – разгружающие выработки; 8 – вспомогательные выработки; 9 – конвейерные сбойки

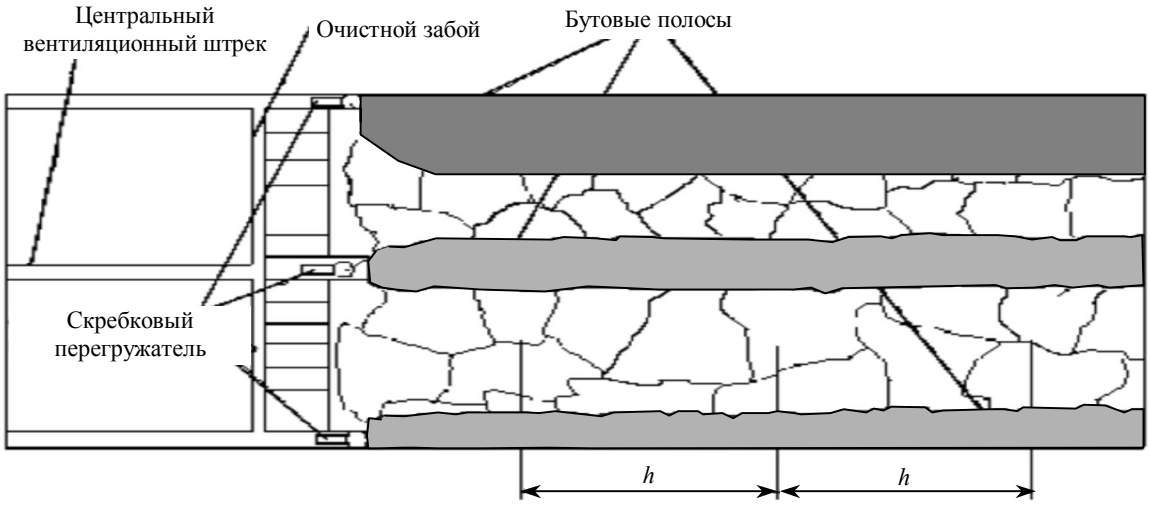


Рис.2. Схема с асимметричным размещением полос закладочного материала
(*h* – шаг обрушения пород основной кровли)

В процессе исследований была подтверждена вероятность возникновения динамических посадок при закладке выработанного пространства бутовыми полосами перпендикулярно очистному забою. В работе [2] также показано, что закладка выработанного пространства бутовыми полосами перпендикулярно линии очистного забоя практически не влияет на НДС массива. Кроме того, при таком размещении полос закладочного материала происходит увеличение шага обрушения основной кровли за счет ее опоры на эти полосы. Кровля накапливает необрушаемый пролет, что приводит к разрушению забойной крепи под действием массы блока пород основной кровли и возникновению сильной воздушной волны при ее обрушении.

Для решения этой проблемы предлагается новая схема размещения закладочного материала (рис.3) полосами, параллельными забою в центре выработанного пространства лавы, с шагом, равным установившемуся шагу обрушения основной кровли лавы при

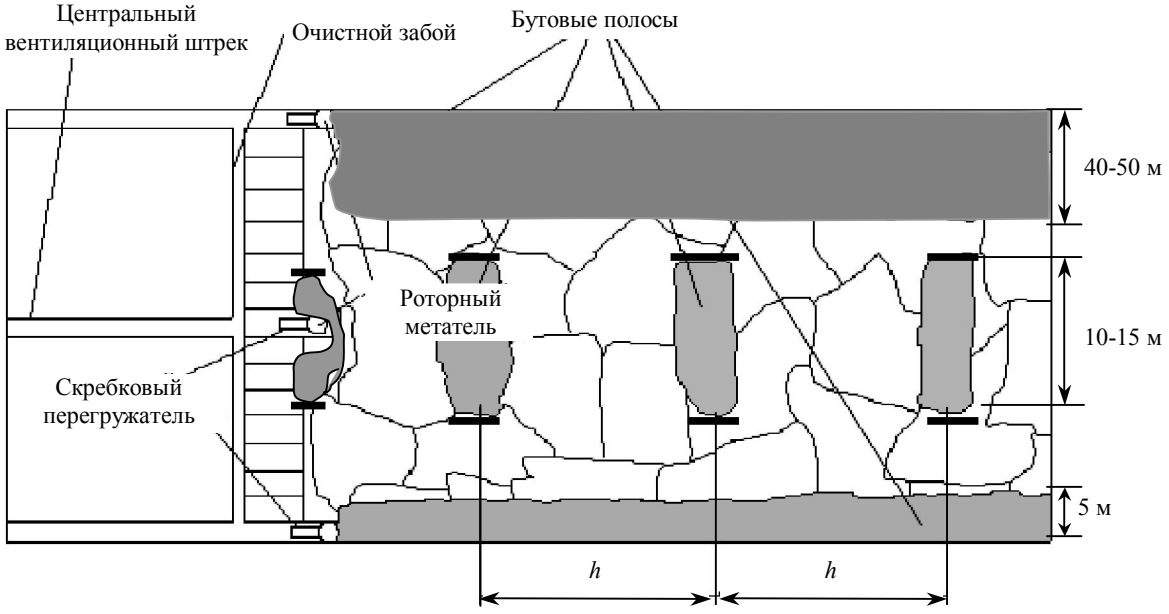


Рис.3. Схема с размещением полос закладочного материала параллельно забою

равномерном движении. Отметим, что в предложенной нетрадиционной схеме размещения закладки используются отбойные щиты для ограничения дальности размещения галита в выработанном пространстве и увеличения плотности закладки, что практически исключает случаи «задавливания» крепи лав за счет накапливания необрушаемого пролета основной кровли. В центральных бутовых полосах возникают зоны повышенных напряжений, в центре которых и происходит разрушение основной кровли.

По этой причине происходит разлом блоков основной кровли с установившимся шагом обрушения, что существенно увеличивает безопасность горных работ. Зависания кровли не происходит, а воздушная ударная волна при обрушениях распространяется только вдоль полос, параллельных очистному забою, и не попадает в призабойное пространство лавы.

Кроме того, в результате применения метателей повышенной производительности появилась возможность осуществить еще один способ управления труднообрушаемой кровлей (рис.4).

Способ осуществляется следующим образом: для подготовки выемочного столба проходят панельный конвейерный штрек, разгружающий штрек, конвейерный штрек лавы, транспортный штрек лавы, центральный вентиляционный штрек. Дополнительно по центру полулавы со стороны массива проходят закладочный штрек. Отбитая порода поступает с забойного конвейера на перегружатель и далее к метателю, при помощи которого ее забрасывают в выработанное пространство на ширину бутовой полосы $L_1/3$. Перегружатель и метатель установлены под крепью сопряжения на конвейерном, вентиляционном и закладочном штреках лавы. Метатели применяются с параметрами, позволяющими возводить бутовые полосы такой ширины, чтобы они перекрывали друг друга, и между ними не оставалось свободного пространства.

Таким образом, производится полная забутовка выработанного пространства первой полулавы, которая располагается со стороны массива. Подготовительная выработка (панельный конвейерный штрек) с одной стороны ограничена массивом полезного ископаемого, а с другой стороны – бутовой полосой, параметры которой при данной ширине восстанавливают свойства массива. Следовательно, данная выработка не

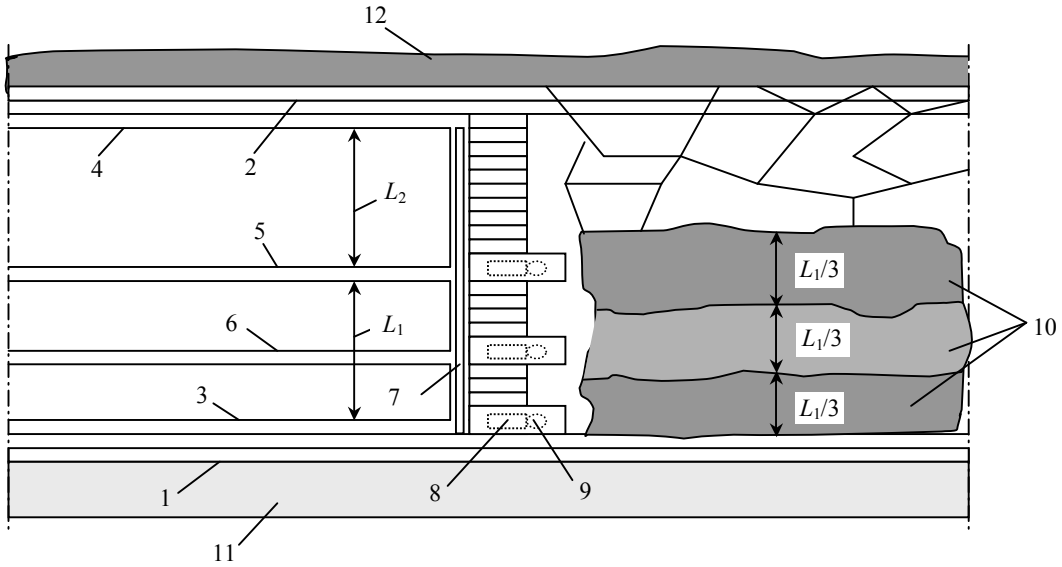


Рис.4. Способы управления труднообрушаемой кровли
1 – панельный конвейерный штрек; 2 – разгружающий штрек; 3 – конвейерный штрек лавы; 4 – транспортный штрек лавы; 5 – центральный вентиляционный штрек; 6 – закладочный штрек; 7 – забойный конвейер; 8 – перегружатель; 9 – метатель; 10 – бутовые полосы; 11 – неотработанный участок шахтного поля, в котором подготавливается следующий выемочный столб; 12 – бутовая полоса отработанного столба; L_1 – длина первой полулавы; L_2 – длина второй полулавы; $L_1/3$ – ширина бутовой полосы

попадает в отработанное пространство и сохраняется для дальнейшего ее использования при подготовке нового столба. Подготовка следующего выемочного столба производится под защитой возведенных бутовых полос без оставления межстолбового целика, при этом панельный конвейерный штрек отработанной панели используется в качестве разгружающего штрека новой панели. Такая подготовка шахтного поля позволяет производить более полное извлечение полезного ископаемого, увеличивая коэффициент извлечения на 10-15 % [3].

Для приближенного исследования проявлений горного давления в начальный период работы лавы рассматриваемая геомеханическая задача достаточно просто сводится к решению одного дифференциального уравнения четвертого порядка [1].

Представляет интерес расчет НДС массива в режиме установившегося движения, когда лава будет с одной стороны ограничена постоянно перемещающимся в процессе горных работ массивом соли, а с другой – закладочным материалом, физико-механические характеристики которого заранее известны. Метод расчета деформаций слоистого массива [1], примененный для начального периода работы лавы, может быть использован и в этом случае, несмотря на необходимость решения весьма громоздкой системы условий сопряжений, отвечающей различным по свойствам участкам слоистого массива и разрабатываемого пласта.

Расчет деформации кровли проводится в предположении, что сложенная горизонтальными слоями кровля опирается на систему целиков (рис.5). Протяженность кровли вдоль оси x не ограничена, деформация рассматривается без отслаивания и проскальзывания слоев относительно друг друга.

Рассматриваются целики и породный массив, на который ложится левая и правая части кровли, как упругое основание, каждый из участков которого характеризуется своим коэффициентом жесткости; в пролетах этот коэффициент равен нулю.

Упругие характеристики кровли D и $g = Gh$, среднее давление на бесконечности $q = \gamma h$, коэффициенты упругого основания k для целиков (k_2, …, k_{n-1}), а также для левого и правого оснований кровли k_0 и k_{n+1}, учитывающие неоднородность кровли, могут иметь разные значения на различных участках кровли и обозначены $D^{(0)}, D^{(1)}, \ldots, D^{(n+1)}$, $g^{(0)}, g^{(1)}, \ldots, g^{(n+1)}$, $q^{(0)}, q^{(1)}, \ldots, q^{(n+1)}$, k_0, k_1, …, k_{n+1} соответственно (рис.5).

Для каждого i-го участка разрешающая система дифференциальных уравнений [1] примет вид

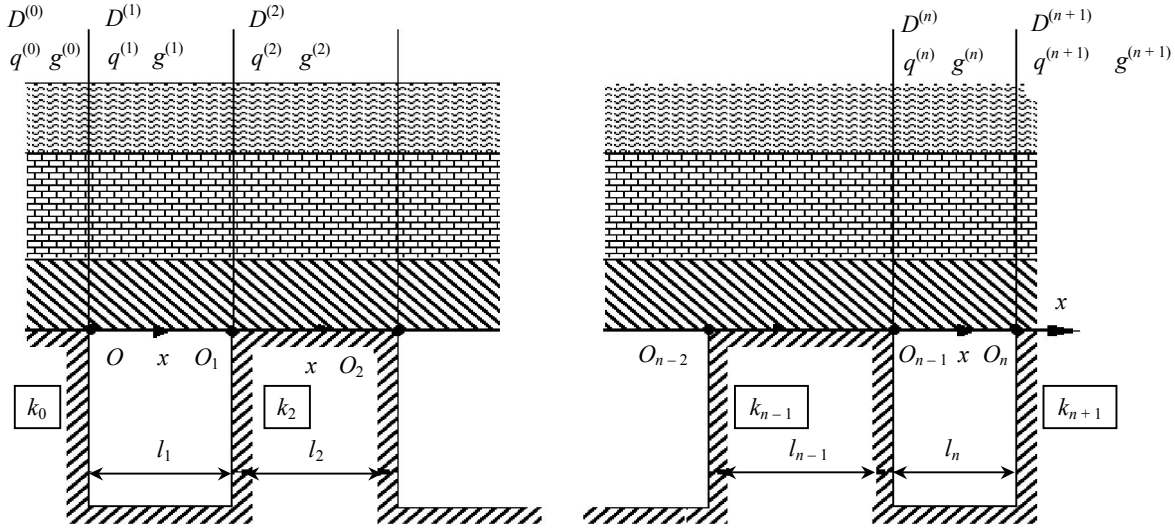


Рис.5. Расчетная схема деформации кровли, опирающейся на целики

$$\begin{cases} D^{(i)}U_i'' - g^{(i)}(U_i + V_i') = 0; \\ g^{(i)}(U_i' + V_i'') + q^{(i)} - k^{(i)}V_i = 0;\ i = 0,1,\ldots,n+1. \end{cases} \quad (1)$$

Решение системы (1) $V_i(x), U_i(x), i = 0,1,\ldots,n+1$ – вертикальные и угловые перемещения на границах каждого участка, т.е. в точках O, O_1, …, O_n, отделяющих в основании кровли участки целик-пролет, должно удовлетворять условиям непрерывности для самих решений и обобщенных моментов и перерезывающих усилий.

Для каждой граничной точки O_k, $k = 0,1,\ldots,n$, с учетом условия, что массив деформируется с непрерывными угловыми перемещениями, примет вид

$$\begin{cases} V_k(l_k) = V_{k+1}(0); U_k(l_k) = U_{k+1}(0); \\ D^{(k)}U_k'(l_k) = D^{(k+1)}U_{k+1}'(0); \\ D^{(k)}U_k''(l_k) = D^{(k+1)}U_{k+1}''(0),\ k = 0,1,\ldots,n. \end{cases} \quad (2)$$

Для левого и правого участков кровли соответствующие решения системы (1) $V_0(x), U_0(x)(-\infty < x \le 0)$ и $V_{n+1}(x), U_{n+1}(x) \times (0 < x \le +\infty)$ должны удовлетворять также следующим граничным условиям:

$$\begin{aligned} &\text{при } x \to -\infty\ U_0(x) \to 0; V_0(x) \to \frac{\gamma h}{k_0}; \\ &\text{при } x \to +\infty\ U_{n+1}(x) \to 0; V_{n+1}(x) \to \frac{\gamma h}{k_{n+1}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, для системы целиков получим $(4n+4)$ условий сопряжений в точках O, O_1, …, O_n (2) и четыре условия на бесконечности (3), из которых находим $(4n+8)$ произвольных постоянных интегрирования общего решения системы уравнений (1) с помощью метода начальных параметров.

Отметим, что при отработке пластовых месторождений с труднообрушаемыми породами кровли происходят периодические осадки, характеризуемые резкими динамическими воздействиями на призабойную зону. В настоящее время одним из распространенных способов управления кровлей является способ полного обрушения. Однако увеличение длины консоли нависающих пород в этом случае приводит к резкому повышению концентрации опорного давления в краевой зоне пласта, что в ряде случаев является причиной разрушения его кромки, и увеличению вывалообразований в очистном забое. В связи с этим частичная или полная забутовка выработанного пространства, помимо экономической выгоды, является еще и более безопасным способом управления кровлей. Для оптимального управления кровлей в указанных условиях достаточно эффективным является предложенный алгоритм расчета ее напряженного состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Господариков А.П.* Алгоритм расчета слоистого массива для прогноза напряженного состояния кровли угольного пласта в зоне очистных работ / А.П.Господариков, С.В.Васильев, М.А.Зацепин // Записки Горного ин-та. СПб, 2003. Т.155(1).

2. Патент 2177546 РФ. МПК 7 Е 21 С 41/18. Способ управления труднообрушаемой кровлей / О.В.Ковалев, Ю.Г.Сиренко, Е.Р.Ковальский и др. 2001. БИ № 36.

3. Патент 2003135720/(038333) РФ. МПК 7 Е 21 С 41/18. Способ управления труднообрушаемой кровлей / Ю.Г.Сиренко, О.В.Ковалев, М.А.Зацепин и др. 2004. БИ № 5.

4. *Сиренко Ю.Г.* Разработка принципиальных технологических схем селективной выемки Третьего калийного пласта на полную мощность / Ю.Г.Сиренко, Т.Е.Кирильченко // Сборник трудов молодых ученых СПГГИ. СПб, 1999. Вып.5.