

УДК 622.83

## ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

Назимко В.В. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Красько Н.И. (Минтопэнерго, г. Киев, Украина)

*Описано нову модель для розрахунку напруженого стану гірського масиву у оточенні очисного вибою. Модель дозволяє встановлювати місця періодичної посадки покрівлі та враховує необоротність цього процесу. Показано, що значення шагу посадки покрівлі має змінне значення та коливається у декілька разів по довжині виїмкового стовпа.*

*New computer model has been developed to simulate dynamic stress state in vicinity of a longwall face. The model helps to localize the sites of roof caving. It was discovered that spatial period of the caving is not stable along a longwall panel.*

Проблема динамических проявлений горного давления в очистных забоях весьма актуальна в связи с ростом глубины разработки и увеличением напряженности вмещающего массива. Подавляющее число динамических проявлений горного давления происходит в окрестности движущегося очистного забоя. При этом происходят выбросы угля и газа, внезапные отжатия груди очистного забоя, вывалы кровли, посадка механизированных крепей «нажестко», горные удары и другие весьма опасные динамические явления. Прогнозирование, оценка степени опасности и управление такими явлениями является актуальной задачей. На сегодня нет эффективных моделей, дающих возможность рассчитать процессы обрушения кровли и перераспределения горного давления при движении очистного забоя.

Наиболее популярные математические модели, которые применяются сегодня для расчета горного давления, основаны на методе конечных, граничных, дискретных элементов и методе конечных разностей решения систем дифференциальных уравнений, описывающих закономерности распределения напряжений в твердом теле. Перечисленные методы с успехом использовались для расчета горного давления по контуру выработанного пространства, на сопряжениях подземных горных выработок и туннелей сложной формы, в основаниях плотин, оснований и фундаментов и других сооружений. В большинстве случаев современные компьютерные пакеты, построенные на основе указанных методов, позволяют моделировать процессы неупругого деформирования участков горного массива в окрестности выработки. Однако для решения поставленной в данной работе задачи этих параметров недостаточно. При подвигании очистного забоя происходят геомеханические процессы, характеризующиеся крайней степенью необратимости. Прежде всего, это касается обрушения породных слоев кровли и ее самоподбуртовки в результате разуплотнения. Эти геомеханические явления являются весьма специфическими, встречающимися только в практике подземных очистных работ. Поэтому группы разработчиков математических моделей и компьютерных программ не ориентируются на развитие специальных алгоритмов для моделирования указанных возможностей в своих продуктах. В современной научной литературе не известны случаи публикации результатов моделирования указанных необратимых явлений с помощью метода конечных или граничных элементов. Известна лишь пара случаев, когда процессы обрушений горного массива и его разуплотнение моделировались прямым образом [1, 2, 3]. В цитируемых публикациях изложены результаты моделирования обрушения кровли при движении очистного забоя, а также обрушение кровли в заброшенных выработках погашенных шахт. При этом естественным или прямым подходом моделировалось разуплотнение пород в процессе их обрушения. Эффект самоподбуртовки при этом получался автоматически.

Однако указанные задачи решались в плоской постановке, то есть в условиях плоской деформации и их прикладное значение весьма относительно. Несмотря на ценность этих результатов моделирования, они носят скорее академическую направленность. Для моделирования процессов пространственного обрушения и самоподбуртовки кровли при анализе реальных горнотехнических ситуаций цитируемые модели и алгоритмы не годятся. Дело в том, что в подавляющем числе случаев пространственным эффектом перераспределения напряжений в горном массиве пренебречь невозможно. Игнорирование трехмерности напряженно-деформированного состояния приводит не только к количественным, но и качественным значительным погрешностям.

Вместе с тем известна модель, которая разработана для пространственного моделирования напряженного состояния горного массива с учетом произвольной конфигурации выработанного пространства, включая учет перераспределения напряжений при отработке свиты пластов [4]. Данная модель построена на базе метода конечных разностей, и с успехом применяется для геомеханического анализа вариантов развития очистных работ в свите пластов. Модель хорошо апробирована в практике угледобычи и продолжает использоваться для прогноза горного давления при развитии очистных работ в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях. Основным достоинством указанной модели является возможность учета произвольной конфигурации выработанного пространства любой сложности и легкость моделирования необратимых процессов при сдвигении массива горных пород. Кроме того, подготовка данных для расчета максимально автоматизирована и предельно упрощена, что уменьшает трудоемкость использования алгоритма и количество ошибок моделирования. На основании этих преимуществ модель [4] принимается в качестве базы для создания алгоритма расчета обрушений кровли и ее самоподбуртовки. В связи с этим опишем существующий алгоритм подробнее, а затем дадим его развитие для решения поставленной задачи.

## 1. Применение метода конечных разностей для расчета напряженного состояния массива горных пород

Идея метода конечных разностей состоит в том, что любое дифференциальное уравнение, в том числе и в частных производных, или система таких уравнений, могут быть заменены системой конечно-разностных алгебраических уравнений. Другими словами математическая производная как предел, к которому стремится отношение приращения функции к приращению аргумента при стремлении аргумента к нулю заменяется приближенной производной, отражающей отношение приращения функции к приращению аргумента на конечном интервале. Таким образом, непосредственное дифференцирование заменяется численным. Это обстоятельство дает возможность учитывать весьма широкий круг граничных условий, недоступных непосредственному дифференцированию. Численное решение задач теории упругости, поэтому, применяется в условиях, когда нужно решать сложные задачи, реально возникающие в практике горного дела. Покажем это на примере расчета перераспределения горного давления в окрестности очистных работ, реализуемого методом конечных разностей.

Рассмотрим область горного массива, затронутую очистными работами (рис. 1). Перекрывающие выработанное пространство слои пород можно представить как плиту мощностью  $h$ , покоящуюся на неоднородном основании [5]. Жесткость этого основания максимальна в нетронутым массиве ( $K1$ ) и минимальна над выработанным и обрушенным пространством ( $K2$ ). В местах закладки и сооружения других искусственных сооружений величина жесткости имеет промежуточное значение. Толщина породного слоя, перекрывающего выработанное пространство и определяющего перераспределение горного давления, составляет, как правило, 25-50 м. По сравнению с типичной шириной минимального выработанного пространства, образованного отработкой одной

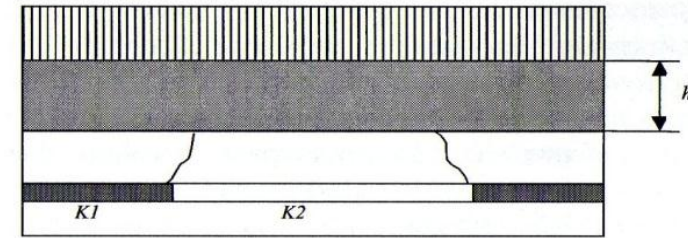


Рис. 1. Расчетная схема для определения напряжений в плоскости пласта при произвольной конфигурации выработанного пространства

лавы толщина определяющего слоя в 5-10 раз меньше. Это дает основание рассматривать указанный слой как тонкую плиту, опирающуюся на неоднородное основание и пригуженную весом вышележащей толщи. Правомерность такого подхода неоднократно подтверждалась предыдущими исследователями [5]. Прогибы такой плиты описываются дифференциальным уравнением в смешанных производных четвертого порядка:

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = \frac{q}{D} - \frac{K\omega}{D}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – прогибы точек плиты;

$q$  – нормальная к срединной плоскости и распределенная по поверхности плиты пригрузка от вышележащей толщи;

$K$  – коэффициент жесткости основания, изменяющийся в зависимости от наличия или отсутствия выработанного пространства;

$D$  – цилиндрическая жесткость плиты;  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ , где  $h$  – мощность плиты.

Численная производная берется как отношение приращения функции (в данном случае опускания точек плиты-кровли) к приращению аргумента (в данном случае длины участка, на котором определяется производная) в соседних точках расчетной сетки, на которую разбивается анализируемая область. В принципе для приближенного определения производной

необходимо значения функции хотя бы в двух соседних точках расчетной сетки. Чем выше порядок производной, тем больше соседних точек необходимо для определения производной. Для численного нахождения производных из уравнения (1) приведен на рис. 2 шаблон, согласно которому удобно рассчитывать приближенную производную опусканий плиты [6]. В результате дифференциальное уравнение (1) заменяется конечно-разностным аналогом для прямоугольной сетки с размерами элементарной ячейки  $a$  и  $b$ :

$$(6\alpha^2 + 8\alpha + 6)\omega_0 - 4(\alpha + 1)(\omega_1 + \alpha\omega_2 + \omega_3 + \alpha\omega_4) + 2\alpha(\omega_5 + \omega_6 + \omega_7 + \omega_8) + (\omega_9 + \alpha^2\omega_{10} + \omega_{11} + \alpha^2\omega_{12}) = \bar{q}_0 - \bar{K}_0\omega_0, \quad (2)$$

где  $\alpha = \frac{a}{b}$ ;  $\bar{q}_0 = \frac{q_0 b^4}{D}$  – приведенная интенсивность внешней нагрузки в центральной точке  $O$  конечно-разностного ромбовидного эквивалента (рис. 2);

$\bar{K}_0 = \frac{K_0 b^4}{D}$  – приведенный коэффициент жесткости основания в точке  $O$ .

Составление конечно-разностных уравнений производится для всех точек плиты. Эту весьма громоздкую работу берет на

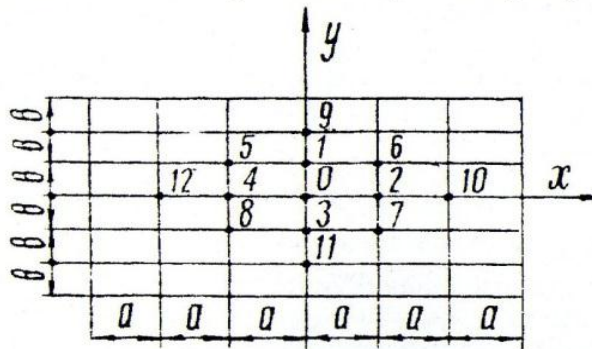


Рис. 2. Конечно-разностный эквивалент-шаблон: 1-12 – номера узловых точек для составления уравнения в центральной точке шаблона

себя компьютер, поскольку в точках, примыкающих к границам плиты, ромбовидный шаблон становится усеченным из-за отсутствия ряда соседних узлов, что меняет вид уравнения. Работа программы начинается с ввода исходных данных, к которым относятся геометрические характеристики плиты, расчетной разностной сетки, а также деформационные характеристики плиты и основания. Для экономии времени подготовки исходные данные могут вводиться только на границах расчетной и характерных областей, а в тех местах, где исходные параметры постоянные, входные величины просто размножаются.

Далее следует автоматическое вычисление коэффициентов при неизвестных прогибах в зависимости от местоположения расчетного узла сетки. После этого решается система линейных алгебраических уравнений, и находятся опускания плиты-кровли по всей площади выработанного пространства:

$$[W] \cdot [NL] = [q], \quad (3)$$

где  $[W]$  – вектор-строка опусканий узловых точек;

$[NL]$  – матрица коэффициентов при неизвестных;

$[q]$  – вектор-столбец заданных узловых нагрузок.

В результате решения системы (3) получаем вектор опусканий узлов плиты. По этим величинам находим все силовые факторы плиты по формулам:

нормальное контактное давление в основании плиты:

$$\sigma_z = K_0 \omega; \quad (4)$$

погонный изгибающий момент в направлении оси  $X$ :

$$M_x = -D \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) = -\frac{D}{b^2} [\alpha(\omega_4 - 2\omega_0 + \omega_2) + \mu(\omega_3 - 2\omega_0 + \omega_1)]; \quad (5)$$

погонный изгибающий момент в направлении оси  $Y$ :

$$M_y = -D \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right) = -\frac{D}{b^2} [\alpha(\omega_3 - 2\omega_0 + \omega_1) + \mu(\omega_4 - 2\omega_0 + \omega_2)]; \quad (6)$$

погонный крутящий момент:

$$M_{xy} = -D(1-\mu) \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} = -\frac{D(1-\mu)}{4ab} [(\omega_8 + \omega_6) - (\omega_7 + \omega_5)]; \quad (7)$$

погонная поперечная сила в направлении оси X:

$$Q_x = -D \left( \frac{\partial^3 \omega}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \omega}{\partial x \partial y^2} \right) = -\frac{D}{2ab^2} \left[ \alpha(\omega_{12} - 2\omega_4 + 2\omega_2 - \omega_{10}) + (\omega_8 - \omega_7 - 2\omega_4 + 2\omega_2 + \omega_5 - \omega_6) \right]; \quad (8)$$

погонная поперечная сила в направлении оси Y:

$$Q_y = -D \left( \frac{\partial^3 \omega}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 \omega}{\partial x^2 \partial y} \right) = -\frac{D}{2b^3} \left[ \alpha(\omega_8 - \omega_5 - 2\omega_3 + 2\omega_1 + \omega_7 - \omega_6) + (\omega_{11} - 2\omega_3 + 2\omega_1 - \omega_9) \right]; \quad (9)$$

Контактное давление используют для оценки зон ПГД, опорного давления, зон разгрузки. Изгибающие моменты применяют для оценки разрушений плиты-кровли от нормальных напряжений. Как правило, для горных пород предельное состояние определяют, прежде всего, по растяжению, прямо пропорциональному изгибающему моменту и обратно пропорциональному моменту сопротивления сечения плиты-кровли. По крутящему моменту и поперечным перерезывающим силам определяют предельное состояние плиты кровли по касательным нагрузкам. Имея паспорт прочности породы кровли, можно определить на основании полученных силовых характеристик плиты-кровли ее возможное запредельное состояние в любой расчетной точке.

Вышеописанный алгоритм является весьма эффективным инструментом для оценки напряженного состояния кровли пласта и прилегающего к нему массива горных пород. Преимущество данного метода состоит в том, что он обрабатывает широкий диапазон граничных условий. Для аналитического метода решения дифференциального уравнения (1) даже незначительное

усложнение граничных условий приводит к катастрофическому усложнению задачи.

2. Описание модели процессов динамического обрушения кровли при движении очистного забоя.

Обрушение кровли является сложным геомеханическим динамическим явлением, сопровождающимся рядом взаимодействующих процессов. Главными из них являются собственно обрушение кровли и ее самоподбутовка в результате разрыхления обрушившихся пород. Очень важно учесть то обстоятельство, что процессы перераспределения напряжений в подработанной толще в результате зависания плит-слоев, изменения условий опоры этих плит, увеличения-уменьшения пролета зависания, изменения величины разрыхления обрушенных пород весьма сложны из-за существенного взаимовлияния перечисленных отдельных процессов друг на друга во времени и пространстве. Это взаимовлияние приводит к возникновению периодических явлений обрушения-зависания слоев кровли. Поэтому весьма важной задачей является разработка алгоритма расчета указанных процессов. Весьма желательно при этом, чтобы алгоритм сохранял физический смысл основных перечисленных процессов. Сложность данной задачи состоит в том, что существующие популярно используемые алгоритмы расчета напряженно-деформированного состояния массива в окрестности очистного забоя (метод конечных элементов, граничных элементов) не способны моделировать периодические явления перераспределения напряжений в динамике в процессе движения очистного забоя.

Учитывая сказанное, в данной работе использован прямой алгоритм моделирования процессов обрушения кровли. Задача решалась путем учета двух основных геомеханических процессов: обрушения кровли и самоподбутовки подработанной толщи. Исходя из фундаментальных положений теории плиты [7], обрушение плиты кровли моделировалось следующим образом. Приняв в качестве теории прочности плиты

энергетическую теорию, получаем условие начала процесса обрушения:

$$\sigma_e = \sqrt{(\sigma_{x(y)}^2 + 3\tau_{xy}^2)} > [\sigma], \quad (10)$$

где  $\sigma_e$  – эквивалентное напряжение;

$\sigma_x$  или  $\sigma_y$  – нормальные растягивающие напряжения, действующие в плите-слое в направлении  $x$  и  $y$  соответственно;

$\tau_{xy}$  – касательные напряжения;

$[\sigma]$  – допустимые напряжения.

Сжимающие нормальные напряжения при этом не учитываются, поскольку предел прочности пород на растяжение в 5-10 раз меньше предела прочности на сжатие и поэтому является критическим параметром с точки зрения целостности плиты-кровли. На этом же основании в качестве допустимого напряжения принимается предел прочности на растяжение. В связи с тем, что скорость подвигания очистного забоя изменяется в пределах 20-200 м/мес. и даже более, величина предела прочности будет существенно зависеть от этой скорости. В связи с этим выполнены специальные исследования зависимости предела прочности на растяжение от скорости подвигания очистного забоя. Полученная зависимость будет использоваться при разработке данной модели.

Как уже указывалось, удовлетворение равенства эквивалентных напряжений пределу прочности свидетельствует только о начале возможного обрушения кровли. Высота обрушения кровли зависит от прочности и мощности слагающих ее слоев. Авторами было установлено, что высота обрушения слоистой кровли может быть определена по зависимости.

$$H_{ост} = H \cdot c_1 \cdot [\sigma] / \sigma_e, \quad (11)$$

где  $H$  и  $H_{ост}$  – первоначальная высота зоны потенциальных обрушений кровли и остаточная ее мощность после обрушения;

$c_1$  – коэффициент пропорциональности.

Для вычисления эквивалентных напряжений используются формулы теории плит:

$$\sigma_x(i,j) = M_X(i,j) / W_{res}, \quad (12)$$

$$\sigma_y(i,j) = M_Y(i,j) / W_{res}, \quad (13)$$

$$\tau_{xy}(i,j) = M_{XY}(i,j) / W_{rot}, \quad (14)$$

где  $M_X(i,j)$  – величина погонного изгибающего момента вдоль оси  $X$  в узле  $(i,j)$  расчетной сетки, определяется по ф. (5);

$M_Y(i,j)$  – то же в направлении  $Y$ , определяется по ф. (6);

$M_{XY}(i,j)$  – величина крутящего момента в узле расчетной сетки, вычисляется по ф. (7);

$W_{res} = H^3 / 6$  – момент сопротивления изгибным деформациям плиты-слоя;

$W_{rot} = \beta \cdot H^3$  – момент сопротивления вращательным деформациям;

$\beta$  – корректировочный коэффициент, который принимается согласно таблицам из справочников по теории сопротивления материалов [7].

В целях упрощения расчетов найдена следующая эмпирическая зависимость корректировочного коэффициента от мощности плиты и размера шага разбивки расчетной сетки  $b$ :

$$\beta = H / b \cdot 0,32 - 0,14. \quad (15)$$

Таким образом, процесс обрушения плиты-кровли моделируется естественным образом путем сравнения действующих напряжений в плите с допустимыми. При этом сохраняется физический смысл процесса обрушения.

Точно так же моделируется и эффект самоподбуртовки подработанной толщи при ее обрушении. Специальными исследованиями было установлено что, величина подбуртовки

пропорциональна отношению предела прочности к величине действующих напряжений:

$$GK1(i,j) = GK(i,j) \cdot c_2 \cdot \sigma_e / [\sigma], \quad (16)$$

где  $GK(i,j)$  – первоначальная жесткость основания плиты-кровли в узле  $(i,j)$  расчетной сетки с учетом того, что выработанное пространство не заполнено обрушенными породами;

$GK1(i,j)$  – скорректированная жесткость основания с учетом высоты обрушения;

$C_2$  – коэффициент пропорциональности.

Блок-схема процедуры моделирования процесса обрушения кровли и ее самоподбуктовки выглядит следующим образом (рис. 3). Как уже указывалось, задача о сдвигении пород подработанной толщи решается численным методом, при котором расчетная область разбивается на конечное число узлов. В каждом узле вводятся индивидуальные параметры модели: мощность кровли в зоне обрушения, приведенный модуль упругости и коэффициент Пуассона, приведенный предел прочности, напряжения, действующие в данном узле до начала подвигания очистного забоя на очередной шаг, опускания массива при его подработке и другие показатели, необходимые при расчете процесса перераспределения напряжений в массиве горных пород. Геологические и геомеханические параметры, такие как мощность кровли, ее деформационные характеристики и предел прочности вводятся из специальных файлов, которые готовятся по данным геологоразведки, а также по данным доразведки и уточнения указанных характеристик в процессе ведения смежных горных работ. При этом данные вводятся в отдельных точках или узлах расчетной схемы, соответствующих координатам реальной области, с которой берутся исходные данные для расчета. Затем интерполяционным пакетом производят детальную поузловую интерполяцию этих расчетных данных по всей площади выемочного столба, в пределах которого осуществляется подвигание очистного забоя. Именно в



Рис. 3. Блок-схема алгоритма моделирования процесса обрушения кровли и ее самоподбуктовки

этих пределах расчетной области осуществляется проверка прочности плиты-кровли. Для этого в текущем узле выбираются исходные данные для расчета, мощность плиты-кровли, ее деформационные прочностные показатели.

Напомним, что в качестве прочности используется приведенный предел прочности на растяжение, определяемый по зависимости, которая учитывает местоположение породного слоя относительно обнажения непосредственной кровли [8]. Именно таким приемом учитывается то обстоятельство, что разрушение кровли начинается всегда в этом месте, хотя в сопротивлении полному обрушению принимают участие все слои, слагающие толщу на потенциальную высоту полных обрушений. Затем вычисляются моменты сопротивления, а также нормальные и касательные напряжения по формулам (12-14). Эти величины используются в условии прочности кровли (10), которое проверяется в каждом узле расчетной сетки, принадлежащем выработанному пространству движущейся лавы. При нарушении этого условия осуществляется корректировка мощности плиты и жесткости основания по формулам (11) и (16). После проверки прочности в каждом узле текущего выработанного пространства, которое образовано движущейся лавой, производится подвижка очистного забоя на шаг расчетной сетки, и все операции описанного цикла повторяются столько раз, сколько указано шагов подвигания очистного забоя. В процессе подвигания запоминаются все силовые характеристики плиты-кровли и ее остаточная мощность для дальнейшего анализа. Так выглядит алгоритмическая модель обрушения кровли и ее самоподбутовки.

Как указывалось в предыдущем пункте, зависимость предела прочности на растяжение от времени нагружения является весьма важной для правильного функционирования модели. Поэтому были выполнены специальные исследования такой зависимости, что позволило простым способом моделировать разные скорости подвигания очистного забоя. Поясним этот подход на конкретном примере. Пусть средневзвешенная прочность кровли на растяжение составляет 0,1 МПа. С учетом корректировки на переход от образца к



Рис. 4. Зависимость приведенного предела прочности на растяжение от скорости подвигания лавы

массиву эта величина отвечает кратковременному нагружению при испытании образца породы на стандартном прессе. Указанный предел прочности соответствует скорости подвигания очистного забоя порядка 500-1000 м/мес. Поэтому принимается такая поправка на первоначальную величину прочности, которая отвечает реальной скорости подвигания очистного забоя. Так если скорость равна 120 м/мес., первоначальная величина прочности умножается на 0,71. При скорости 40 м/мес. поправочный коэффициент равен 0,68 и т.д. Таким образом, перед моделированием процесса обрушения кровли в конкретном очистном забое размечается скорость его подвигания, которая может быть и неравномерной, а затем на соответствующих участках подвигания принимаются скорректированные пределы прочности с учетом графика на рис. 4. Это означает, что скорость подвигания учитывается не явно, а через время прохождения очистным забоем конкретного отрезка расчетной сетки между соседними его узлами.



### 3. Проверка работоспособности разработанного алгоритма

Проверка работоспособности алгоритма моделирования процессов обрушения кровли и ее самоподбуртовки проводилась на примере отработки одиночной лавы в типичных условиях работы угольных очистных забоев наиболее производительных шахт Украины. В качестве наиболее производительных шахт были выбраны такие как шахта «Комсомолец Донбасса», «Южнодонбасские №1 и №3», «Красноармейская-Западная», «Краснолиманская», им. Засядько, «Трудовская», «Западно-Донбасская» и ряд других. Анализ условий работы таких шахт показал, что средний диапазон глубины разработки угольных пластов на указанных шахтах составляет 480-600 м. Шахта им. Засядько по причине исключительно большой глубины разработки была пока исключена из списка анализируемых. При этом кровля относится к легкообрушаемой, а вынимаемая мощность пласта составляет 1,1-1,9 м. Угол падения пород составляет  $5-8^{\circ}$ , что также весьма типично не только для отечественных, но и зарубежных высокопроизводительных шахт. Вмещающие породы средней крепости с пределом прочности на одноосное сжатие 30-50 МПа. Для добычи угля применяются высокопроизводительные и достаточно надежные комплексы с механизированной крепью КД-90, «Глиник» и им подобные. Длина лавы изменяется в пределах 180-250 м. Скорость подвигания очистных забоев составляет 80-150 м/мес. Выбор таких условий выгоден тем, что они достаточно близки к условиям работы производительных очистных забоев зарубежных стран, таких как Польша, США, Австралия. Это позволяет использовать большой объем опубликованных данных натуральных измерений проявлений горного давления, которые могут быть использованы для оценки работоспособности разработанной модели и достоверности результатов расчета процесса обрушения кровли и перераспределения горного давления. В данном пункте дана первичная оценка работоспособности модели.

В качестве примера для проверки работоспособности разработанного алгоритма был выбран типичный случай отработки одиночного столба длиной 1700 м по простиранию лавой длиной 200 м. Вынимаемая мощность пласта 1,5 м, высота зоны полных обрушений составляет 20 м, то есть мощность плиты-кровли, участвующей в активном перераспределении напряжений в подработанной толще составляла 30 м, что весьма характерно для Донбасса. На рис. 5 показаны последовательные этапы обрушения слоя пород на высоту, составляющую не менее 20% от общей зоны полного обрушения по мере подвигания очистного забоя. Таким пороговым значением можно отстроиться от мелких обрушений непосредственной кровли на незначительную высоту с одной стороны и ограничить анализ обрушением слоев, находящихся в непосредственной близости к очистному забою и вследствие этого играющих основную роль в динамике горного давления.

Последовательный анализ процесса обрушения позволяет выделить первичную посадку основной кровли, которая отчетливо оконтурена эллипсовидной формой контура обрушения при отходе лавы от разрезной печи примерно на расстояние, равное длине лавы. Такой эффект многократно наблюдался на физических трехмерных моделях и в натуральных условиях.

По мере подвигания лавы отмечаются периодические обрушения вслед за лавой и одновременно идут дообрушения слоев, которые зависли и какое-то время сохраняли устойчивость над выработанным пространством лавы. Периодические обрушения кровли вслед за подвиганием лавы видны практически на всех снимках, а возврат дообрушения отчетливо виден на этапе 3.

Окончательная последовательность обрушений на высоту порядка 0,2 высоты полных обрушений показана на рис. 6. На схеме отчетливо видно, что шаг обрушения не является строго постоянным, а изменяется по мере подвигания лавы в пределах 10-30 м. Такой эффект также весьма закономерен и многократно подтверждается результатами натуральных наблюдений.

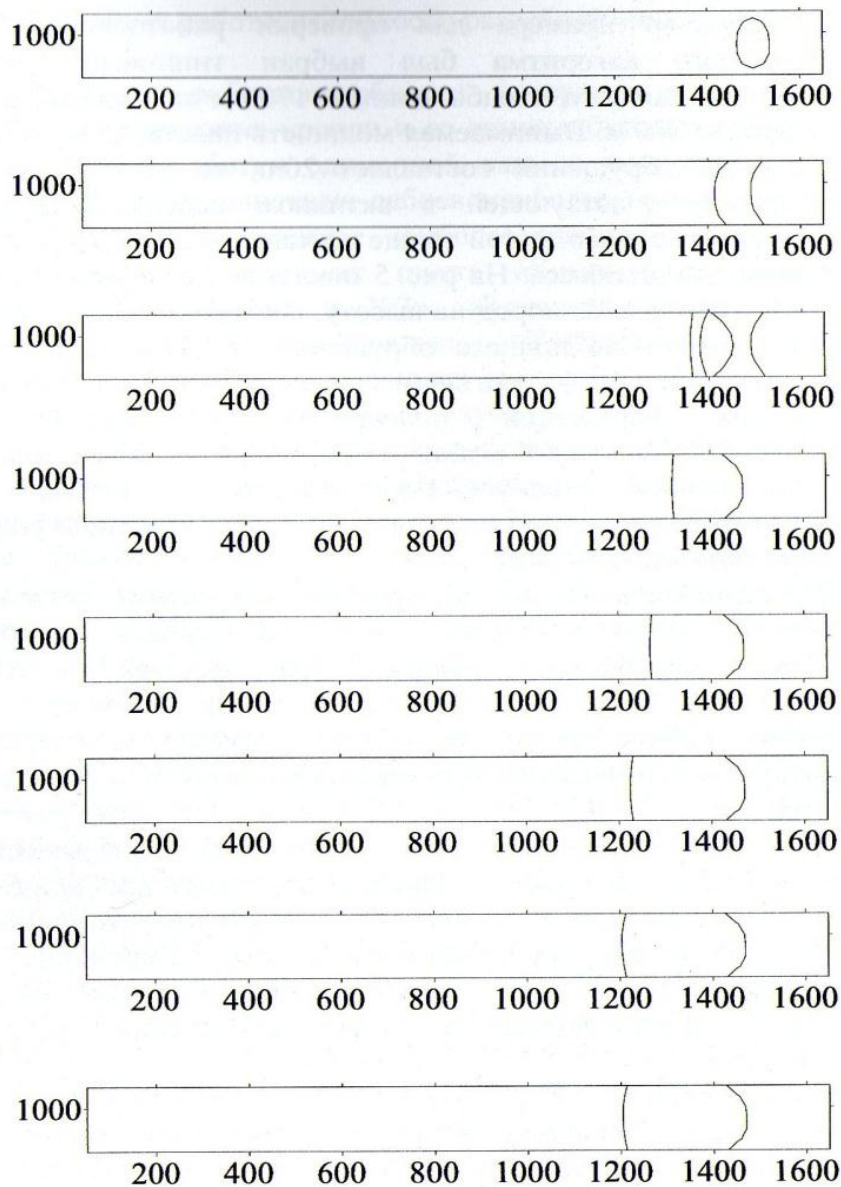


Рис. 5. Развитие обрушения кровли в пространстве по мере подвигания очистного забоя

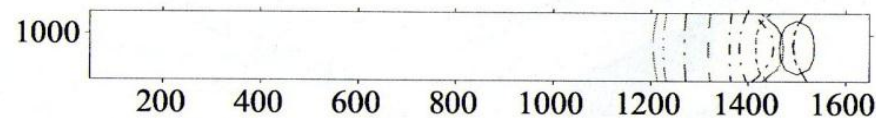


Рис. 6. Совмещенная схема обрушений

На рис. 7 для сравнения показаны результаты расчета шага посадки кровли в очистном забое одной из австралийских шахт для исходных условий, близких к моделируемым, а также данные натурального мониторинга скорости нарастания давления в гидросистеме стоек посадочной крепи [1]. Вертикальными линиями показаны места обрушений кровли, а график на боковой стороне диаграммы характеризует скорость нарастания давления в гидросистеме крепи. Нельзя сказать, что расчетные данные и результаты измерений совпадают полностью, однако характер их изменения достаточно сходен. Из этих данных видно, что шаг посадки кровли непостоянен и колеблется в диапазоне 10-20 м, что совпадает с полученными в данной работе результатами. Подчеркнем, что разброс расчетных величин шага посадки кровли не связан с вариацией свойств вмещающих пород и случайного изменения отпора крепи, поскольку расчет методом дискретных элементов проводился в детерминированной постановке.

Непостоянство шага периодического обрушения кровли установлено многочисленными результатами мониторинга динамики нагрузки на крепь очистных забоев американских шахт. Так в [9] даны примеры оценки средневзвешенной величины давления в гидравлических стойках (рис. 8, экспериментальные точки, обозначенные квадратами) и скорости нарастания давления в гидросистеме (крестики). Установлено, что скорость нарастания давления является наиболее информативным показателем динамических процессов в кровле, с которыми чаще всего ассоциируется обрушение отдельных составляющих ее слоев. Фурье анализ позволил выделить около 7

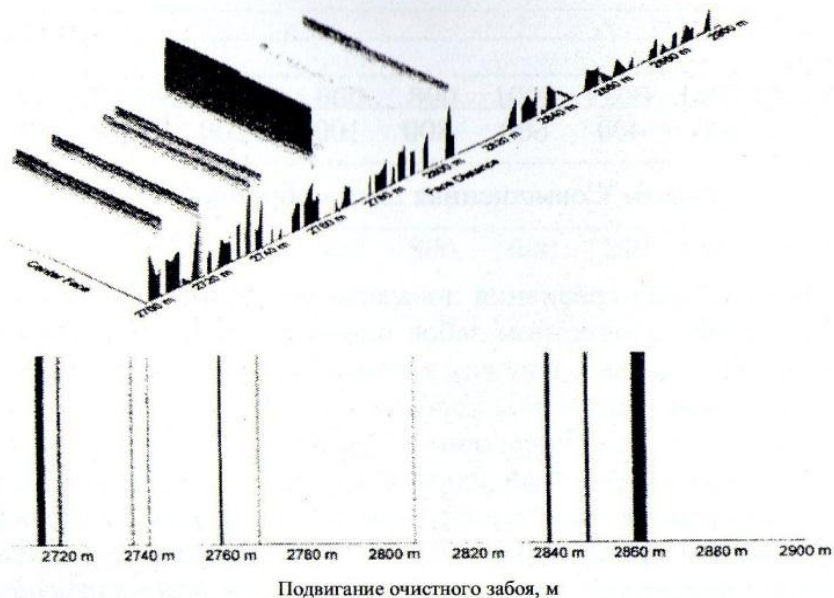


Рис. 7. Развитие обрушения кровли в пространстве по мере подвигания очистного забоя

гармоник периодических динамических явлений в процессе сдвижения подрабатываемого массива. На рис. 8 отчетливо видны периоды обрушения с шагом 7,0-7,2 м (с 18 фута по 42-й и с 42-го по 64-й), 18,3 м (с 64-го по 125-й) и 12,4 м (с 125-го по 146-й). Характерно, что эти гармоники проявились на интервале подвигания в 50 м практически одна вслед за другой. Несмотря на просматривающуюся периодичность обрушения, очевиден факт отсутствия строгой периодики и сложной картины чередуемости шагов обрушения, что свидетельствует о наложении процессов обрушения отдельных породных слоев и их взаимовлияния. Именно такой характер и позволяет выявить разработанная геомеханическая модель динамических проявлений сдвижений кровли в процессе подвигания очистного забоя.

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют о том, что в большинстве случаев в реальных условиях отработки

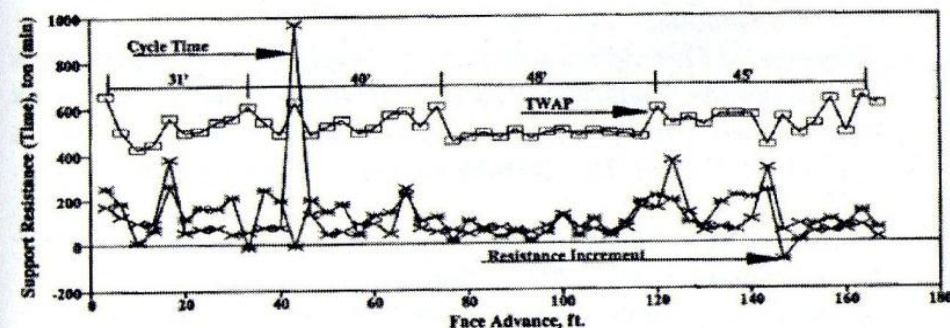


Рис. 8. Результаты мониторинга давления в гидростойках крепи очистного забоя по мере его подвигания

угольных пластов шаг обрушения кровли имеет плавающую величину по длине выемочного столба, что затрудняет применение существующих классификаций кровли по обрушаемости для прогноза этого важнейшего параметра. В связи с этим разработанная модель может эффективно применяться для прогноза периодических обрушений кровли в очистном забое в процессе его подвигания.

### СПИСОК ССЫЛОК

1. Gale W.J. Experience in computer simulation of caving, rock fracture and fluid flow in longwall panels // Geomechanics/Ground control in mining and underground construction. Wollolngong, 1998. Pp. 997-1007.
2. Иофис И.М. Компьютерное моделирование обрушения пород кровли в выработанном пространстве // Горный информационно-аналитический бюллетень, МГТИ. – 1998. – №4. – С. 20-31.
3. Звягильский Е.Л. Длительные сдвигения массива в окрестности погашенных стволов // Маркшейдерский вестник. – 1999. – №3. – С. 20-22.
4. Назимко В.В., Захаров В.С. Оценка напряженно-деформированного состояния толщи при произвольном

- порядке и очередности отработки запасов в свите пластов // Уголь Украины. – 2002. №8. – С. 21-23
5. Зборщик М.П. Разработка технологий управления вмещающим массивом и устойчивостью основных подготовительных выработок пологих пластов на больших глубинах: Дисс... д-ра техн. наук: 05.15.02. – Донецк, – 1983. – 445 с.
  6. Клепиков С.Н. Расчет конструкций на упругом основании. – Киев: Будивельник, 1967. – 184. с.
  7. Беляев В.С. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1976. – 607 С.
  8. Грядущий Ю.Б. Геомеханические основы управления вывалоопасными кровлями в очистных забоях: Дисс... д-ра техн. наук: 05.15.02. – Макеевка, 1997. – 215 с.
  9. Mark Hart W., Peng S.S., Chen J.S. Longwall Production, Maintenance, and Roof Control System // 13t Conference on ground control in mining. August 2-4, 1994. – Morgantown. Pp. 136-147.