

*д.т.н. Бабиюк Г.В.,  
Диденко М.А.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## **ДВУХЭТАПНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВЫРАБОТОК**

*Наведені основні положення методики двохетапного прогнозування проявів гірського тиску у виробці, що проводиться, і вибору раціональних параметрів кріплення.*

***Ключові слова:** напружено-деформований стан, зміщення породного контуру, навантаження на кріплення.*

*Приведены основные положения методики двухэтапного прогнозирования проявлений горного давления в проводимой горной выработке и выбора рациональных параметров крепи.*

***Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, смещения породного контура, нагрузка на крепь.*

Проблема прогнозирования проявлений горного давления в подземных выработках имеет давнюю историю. Однако она до сих пор не потеряла своей актуальности, так как при разработке проекта проведения выработки перед проектировщиком встает непростая задача определения смещений контура выработки и нагрузок на крепь, решение которой осложняется отсутствием достоверной информации об исходном напряженно-деформированном состоянии массива, о свойствах горных пород, о взаимодействиях породного массива с крепью выработки и т.д. В связи с этим на практике при расчете пользуются упрощенными методиками и недостоверными исходными данными, поэтому назначаемые параметры крепи далеко нерациональны, в ряде случаев крепь не обеспечивает требуемой устойчивости выработки.

При принятии решений в условиях неполной информации выход возможен за счет перехода на двухстадийное проектирование, когда первоначальный проект подлежит корректировке непосредственно в ходе строительства выработки, если свойства пород и напряженно-деформированное состояние массива отличаются от исходных, использованных при разработке проекта.

Впервые вопрос о необходимости перехода на двухстадийное проектирование при сооружении выработок был поднят в работах [1, 2], а реали-

зован на практике такой подход был при проведении выработок в условиях пучащих пород [3]. Однако упор был сделан на повышение точности и представительности инженерно-геологических изысканий, а также на упрощение порядка пересмотра и утверждения проектной документации. При этом вопрос создания насущно необходимой для такого рода проектных работ методики двухэтапного прогнозирования проявлений горного давления в выработке долгое время оставался открытым, чему и была посвящена настоящая работа.

В связи с развитием компьютерного моделирования геомеханических процессов в окрестности выработки и обоснованием научных положений методологии обеспечения устойчивости выработок в изменчивых и неопределенных условиях их сооружения [4], двухэтапное прогнозирование проявлений горного давления при проведении выработок стало реальностью. Сущность такой методики состоит в определении параметров крепи на базе прогнозируемых смещений пород и нагрузок на крепь в два этапа. На первом этапе при разработке проекта проведения выработки производится сугубо приближенный, оценочный прогноз размеров зоны неупругих деформаций пород с помощью зависимости, установленной путем обработки результатов моделирования на ЭВМ при помощи метода конечных элементов в широком диапазоне горно-геологических условий и учитывающей основные влияющие факторы. При этом начальное напряженное состояние массива для наиболее ответственных выработок, наличии сближенных взаимовлияющих выработок или воздействия очистных работ оценивается путем численного решения прямой задачи.

На втором этапе при проведении выработки текущий прогноз проявлений горного давления обеспечивается последовательным решением плоских численных задач, периодически корректируемых путем шахтных инструментальных наблюдений с целью определения пространственно-временной функции распределения вокруг выработки коэффициента трещинной пустотности пород. Этот показатель связан корреляционными зависимостями с параметрами контроля состояния пород и функционально со смещениями породного контура выработки и отражает стадию развития деформационных процессов в зоне влияния забоя в окрестности выработки. Компьютерное моделирование на этапе текущего прогнозирования производится с помощью программного обеспечения, учитывающего широкий спектр механических свойств горных пород, в том числе допредельное, предельное и запредельное состояние пород, реологическое поведение массива при перераспределении напряжений в результате проведения выработки, ослабляющие воздействия геологического и технологического характера, а также силовое взаимодействие с породным массивом рамной податливой крепи, устанавливаемой с предварительным распором. При этом неизвестное исходное поле напряжений устанавливается путем реше-

ния обратной геомеханической задачи, а смещения контура выработки вычисляются по периодически уточняемым регрессионным зависимостям между относительными деформациями и коэффициентом трещинной пустотности, что позволяет получить с заданной точностью оперативную информацию для принятия решений по обеспечению надежности выработки непосредственно при ее проведении.

В привязке к отраслевому стандарту [5] прогнозирование проявлений горного давления при проведении выработки на этапе её проектирования производится в следующем порядке:

1. По данным геологической разведки устанавливается структура и свойства вмещающего выработку породного массива, определяются глубина заложения выработки, диапазоны изменения мощностей слагающих пород и вариация плотностных, прочностных и деформационных свойств пород.

2. В соответствии с техническим проектом шахты выбираются геометрические параметры поперечного сечения выработки, устанавливается её пространственное расположение в породном массиве по отношению к структурным неоднородностям, сближенным выработкам, влияющим на исходное напряженное состояние массива, и очистным работам с учетом их развития в течение всего срока службы выработки.

3. Составляется идеализированная численная геомеханическая модель для исследования напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности выработки без учета крепи и технологии её сооружения и производится пошаговое решение упругопластической задачи в зависимости от основных влияющих факторов: слоистости массива, анизотропии прочностных и деформационных свойств, нарушенных контактов между отдельными породными слоями и т.д.

4. Оценивается достоверность и адекватность геомеханической модели на основе анализа компонент напряжений и перемещений, анализируется степень погрешности допущений и идеализаций расчетной схемы, производится при необходимости корректировка модели и повторный вычислительный эксперимент.

5. На основе результатов предварительного геомеханического моделирования с учетом образования зоны неупругих деформаций вокруг выработки устанавливаются размеры фрагмента породного массива для детального моделирования при текущем прогнозировании проявлений горного давления во время проведения выработки, определяются компоненты напряжений и перемещений на границе фрагмента для последующего нагружения модели на втором этапе моделирования и рассчитывается усредненное значение обобщенного коэффициента бокового распора  $\lambda_0$  как отношение горизонтальных напряжений к вертикальным с учетом действия гравитации.

тационного и тектонического полей напряжений, взаимовлияния выработок и воздействия очистных работ, а также изменчивости свойств пород.

6. Для выбранного фрагмента породного массива устанавливают мощности ( $m$ ) слагающих его слоев пород (не более 5 м) на расстоянии не менее 20 м в кровле и почве от середины выработки и определяют средний расчетный предел прочности пород массива [5]:

$$R = (R_{кр} + R_n) / 2, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где  $R_{кр}$ ,  $R_n$  – соответственно расчетные пределы прочности на одноосное сжатие пород кровли и почвы, МПа, рассчитываемые по формуле:

$$R_{кр(n)} = \frac{R_1 \cdot m_1 \cdot k_1 + R_2 \cdot m_2 \cdot k_2 + \dots + R_i \cdot m_i \cdot k_i}{m_1 \cdot k_1 + m_2 \cdot k_2 + \dots + m_i \cdot k_i}, \text{ МПа}, \quad (2)$$

где  $R_1, R_2, \dots, R_i$  – расчетные пределы прочности на одноосное сжатие отдельных слоев пород, определяемые путем умножения средней прочности пород на одноосное сжатие  $\sigma_c$ , установленной по результатам испытаний стандартных образцов, на коэффициенты структурного ослабления  $k_c$  массива и обводненности пород, принимаемые согласно имеющимся рекомендациям [5, 6 и др.];

$m_1, m_2, \dots, m_i$  – мощности слоев пород, м;

$k_1, k_2, \dots, k_i$  – коэффициенты влияния слоев пород:

$$k_i = \exp \left[ -\alpha \cdot \left( l_i - \frac{h}{2} \right) \right], \quad (3)$$

где  $\alpha$  – эмпирический коэффициент, равный 0,5 для выработок, находящихся вне зоны влияния очистных работ;

$l_i$  – расстояние от середины сечения выработки в проходке до середины определенного слоя пород, м;

$h$  – высота выработки в проходке, м.

7. Для оценки интенсивности проявления горного давления в качестве расчетного параметра используется относительная площадь зоны разрушения пород вокруг выработки ( $S_{pe} = S_p / S_e$ , где  $S_p$ ,  $S_e$  – соответственно абсолютная площадь зоны разрушения и площадь поперечного сечения выработки). По результатам моделирования [7] установлено, что площадь зоны разрушения с удалением от забоя нелинейно возрастает, стремясь к некоторому предельному значению  $S_{pe}(z_3)$ , достигаемому на границе зоны влияния забоя, величина которого зависит от прочности пород ( $c/\gamma H$ ) и исходного поля напряжений ( $\lambda_0$ ). Протяженность зоны влияния забоя  $z_3$  определяется

процессом перераспределения напряжений в результате проведения выработки и зависит, кроме того, от реологических свойств горных пород и скорости проведения выработки. Относительная площадь зоны разрушения от расстояния до забоя выработки аппроксимирована функцией вида:

$$S_{pв}(z) = S_{pв}(z_3) \cdot \left\{ 1 - e^{-\beta(z[k_p + (1-k_p)e^{-z}] - z_0)} \right\}, \quad (4)$$

где  $z = L/R$  – совмещенная с продольной осью выработки безразмерная координата с началом отсчета от забоя;

$S_{pв}(z_3)$  – площадь зоны разрушенных пород на границе зоны влияния забоя;

$z_0$  и  $z_3$  – расстояние, на котором соответственно начинается разрушение пород и заканчивается перераспределение напряжений;

$\beta$  – коэффициент аппроксимации;

$k_p$  – реологический параметр [7].

При моделировании развития зоны разрушения пород вокруг закрепленной выработки было установлено, что пассивный отпор крепи с максимальной несущей способностью не оказывает воздействия на деформационные процессы вокруг выработки. Для того, чтобы возмущения за счет воздействия крепи на массив вышли за пределы погрешности численного метода, несущая способность рам, монтируемых традиционным способом, должна составлять 4000-5000 кН. Одним из способов, позволяющим управлять приконтурным массивом, находящимся в предельном состоянии, является установка крепи с предварительным распором. Расчеты производились для арочной металлической податливой крепи с несущей способностью 160, 200, 350, 435, 540 и 700 кН/п.м. Крепь распиралась между кровлей и почвой с уплотняющим усилием 560 кН, что соответствует установке двух гидростоек типа 2СУГ30 под раму. В результате моделирования установлено, что предварительный распор крепи приводит к уменьшению предельной величины относительной площади зоны разрушения  $S_{pв}(z_3)$  в 1,5-2,4 раза, при этом величина  $S_{pв}(z_3)$  обратно пропорциональна несущей способности крепи  $P$ . Зависимость относительной площади зоны разрушения вокруг выработки может быть аппроксимирована с корреляционным отношением  $\eta_{xly} = 0,8998$  функцией вида:

$$S_{pв}(z_3) = \frac{2,7 \cdot e^{-4,1\lambda_0} + 0,56\lambda_0 - 0,5}{(c/\gamma H)^{1,9} \cdot (1 + 0,002 \cdot P)}, \quad (5)$$

где  $\lambda_0$  – обобщенный коэффициент бокового распора, определяемый численным моделированием; если данные о  $\lambda_0$  отсутствуют, то расчет можно выполнить для нескольких оценочных значений ( $\lambda_0 = v/(1-v)$ ), где

$\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\lambda_o = 1$ ;  $\lambda_o > 1$ ), а в качестве расчетной величины принять наихудший результат;

$c/\gamma H$  – безразмерная величина сцепления пород при прямолинейном паспорте прочности, которую определяют через расчетное сопротивление пород сжатию  $R$  (МПа), если задаться величиной угла внутреннего трения  $\varphi = 20^\circ$ , по формуле:

$$(c/\gamma H) \approx 350 \cdot R/(\gamma \cdot H), \quad (6)$$

здесь  $\gamma$  – объемный вес пород, кН/м<sup>3</sup>;

$H$  – глубина расположения выработки, м.

$P$  – несущая способность крепи, кН/п.м.; если распор рам крепи при установке не предусматривается, следует принять  $P = 0$ .

8. Исходя из размера зоны разрушения пород можно рассчитать высоту свода расслоившихся пород кровли:

$$h_c = 0,56 \cdot k_{кр} \sqrt{(1 + S_{ps}(z_3)) \cdot S_{np}}, \text{ м}, \quad (7)$$

где  $S_{np}$  – площадь поперечного сечения выработки в проходке, м<sup>2</sup>;

$k_{кр}$  – коэффициент, учитывающий долю смещений пород кровли в общих смещениях кровли и почвы, рассчитывается по формуле [5]:

$$k_{кр} = k_n \cdot R_n / (R_{кр} + R_n), \quad (8)$$

где  $k_n$  – коэффициент, учитывающий влияние глубины расположения выработки; для выработок, находящихся вне зоны влияния очистных работ рассчитывается по формуле [5]:

$$k_n = 1,2 - 0,0004 \cdot H. \quad (9)$$

Если рассчитанная по формуле (7) величина  $h_c < 0,2 \cdot B_{np}$ , где  $B_{np}$  – ширина выработки в проходке, м, то следует принять  $h_c = 0,2 \cdot B_{np}$ , м.

9. Рассчитать вес пород, формирующих нагрузку на крепь можно в предположении параболического свода обрушения с учетом возможного динамического проявления горного давления [5]:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot k_d \cdot B_{np} \cdot \gamma \cdot h_c, \text{ кН/м}, \quad (10)$$

где  $k_d$  – коэффициент динамичности загрузки крепи, величина которого принимается в соответствии со стандартом [5] в зависимости от

размера зазора между крепью и кровлей выработки; если крепь устанавливается без зазора с предварительным распором  $k_0 = 2,0$ .

10. Необходимое количество рам крепи  $n$  на 1 м выработки рассчитывают по формуле:

$$n = Q/P_{кр}, \text{ рама/м,} \quad (11)$$

где  $P_{кр}$  – рабочее сопротивление крепи, кН.

Паспортную плотность установки рам крепи следует принять равной ближайшему значению в ряду: 1,0; 1,25; 1,5; 2,0. Если крепь устанавливается с предварительным распором, а несущая способность крепи по проекту отличается более чем на 25% от значения, принятого при определении площади зоны разрушения, величину  $P$  в формуле (5) следует скорректировать, а расчет по пунктам 7-10 нужно повторить.

На втором этапе прогнозирования проявлений горного давления определение параметров, необходимых для принятия решений по обеспечению устойчивости сооружаемой выработки, осуществляется путем сочетания компьютерного моделирования, шахтных исследований места зарождения и закономерностей развития зоны разрушения пород вокруг выработки с помощью скважинных методов, определения реальных значений прочностных и деформационных показателей горных пород по результатам испытаний образцов, отобранных в выработке, и изучения структурно-текстурных особенностей строения и сложения вмещающих выработку пород. Такой подход, соответствующий принципам имитационного моделирования системы «массив – породное обнажение – крепь», периодически корректируемого с помощью шахтных инструментальных наблюдений, позволяет устранить неопределенность в исходной информации и использовать математическое моделирование в период времени между шахтными замерами для текущего прогнозирования необходимых параметров. Суть такого подхода к решению проблемы обеспечения устойчивости выработок заключается не просто в выборе возможной стратегии или обосновании лучшей стратегии, как это делается при оптимизации, а в постоянном движении к наилучшему решению за счет адаптации технологии к среде, которая характеризуется стохастической и природной неопределенностью.

Такое моделирование геомеханических процессов проводится в течение всего жизненного цикла выработки и характеризуется поэтапным и многостадийным приближением модели к реальному объекту путем многократного повторения циклов (итераций) и оценивания достоверности и адекватности полученных результатов. Многостадийность второго этапа прогнозирования проявлений горного давления при проведении выработки подразумевает:

1. Детальное изучение строения породного массива по материалам горно-проходческих работ путем обследования породных обнажений и керна скважин, которые бурят для уточнения размеров отдельных слоев, характера трещиноватости и интроскопии массива;

2. Оценивание физико-механических свойств представительных участков массива путем отбора и испытания образцов для выявления изменчивости прочностных и деформационных показателей в зависимости от генезиса, минерального состава, структурно-текстурных особенностей и других факторов и построение полярных диаграмм и паспортов прочности пересекаемых выработкой пород;

3. Измерение нарушенности пород вокруг выработки с помощью электроемкостного каротажа и замеров смещений пород глубинными реперами, расчет и количественный анализ коэффициента трещинной пустотности пород и построение с помощью ЭВМ пространственно-временных зависимостей коэффициента трещинной пустотности пород, позволяющих в режиме мониторинга следить за развитием геомеханических процессов, сравнивать значения коэффициента с относительными деформациями пород, оценивать состояние выработки и своевременно принимать решения для достижения заданной надежности;

4. Разработку детальной конечно-элементной модели для моделирования на ЭВМ многопараметрических геомеханических процессов в сложно-структурном массиве, ослабленном выработкой произвольной конфигурации, позволяющей воспроизвести кинетику продвижения фронта разрушения пород по мере удаления от забоя выработки, неоднородность и анизотропию прочностных и деформационных свойств пород для каждого конечного элемента как в допредельном, так и в запредельном состоянии пород, многостадийное перераспределение исходного поля напряжений и учесть технологию проведения и крепления выработок;

5. Многостадийное моделирование проявлений горного давления по мере проведения выработки. При этом неизвестное исходное поле напряжений и недостоверные свойства пород определяются путем многовариантного решения методом конечных элементов геомеханической задачи по оценке возможных проявлений горного давления, которая осуществляется путем полного перебора вариантов сочетания неизвестных заранее параметров и параметров, задаваемых по данным шахтных измерений, либо путем использования методов планирования вычислительного эксперимента. Сопоставлением результатов моделирования с реальными показателями проявления горного давления, получаемыми с помощью инструментальных шахтных наблюдений, производится выбор решения, при котором расчетные проявления горного давления в наибольшей степени соответствуют реальным данным. Прежде всего, условием соответствия результатов моделирования, представляемых в виде картин распределения относитель-



ных деформаций и изображения формы зоны разрушения пород, является качественное подобие зарождения и развития геомеханических процессов, вокруг выработки, оцениваемое вначале визуально, что позволяет отбросить решения, кардинально не соответствующие шахтным замерам, и ограничиться анализом небольшого числа вариантов расчета. Количественными критериями сравнения служат равенства относительных размеров зоны разрушения в характерных направлениях для одного и того же момента времени, а также расчетной и фактической относительной площади зоны разрушения  $S_{pв}(z_3)$  на определенном расстоянии от забоя выработки. Основным выходным параметром на первой стадии моделирования является коэффициент бокового распора  $\lambda_o$ , то есть соотношение горизонтальных и вертикальных напряжений на границе фрагмента массива.

При многостадийном моделировании нестационарность поля распределения напряжений в области влияния забоя выработки обеспечивается за счет решения псевдо-пространственной задачи, заключающейся в замене пространственной задачи о формировании зоны разрушения пород вокруг выработки рядом последовательно решаемых плоских. Для упрощения модели породный массив заменяется невесомым фрагментом, ослабленным выработкой и загруженным по внешнему контуру фиктивной нагрузкой, задаваемой при моделировании в зависимости от расстояния до проходческого забоя безразмерной функцией, учитывающей реологические свойства пород и скорость проведения выработки.

Вся серия решений реализуется на одной сети треугольных конечных элементов, позволяющих учесть неоднородность и анизотропию свойств породного массива, неправильную конфигурацию породного контура выработки, наличие зоны взрывного разрушения и воздействие крепи на породы. Изменение поля напряжений в призабойной части выработки и свойств пород в зоне неупругих деформаций учтено автоматически путем задания на каждом последующем шаге решения задачи новых начальных и граничных условий, получаемых из предыдущего шага. Состояние пород в зоне неупругих деформаций описано кусочно-линейной моделью среды с разупрочнением и разрыхлением пород, а нелинейная связь между напряжениями и деформациями воспроизведена с помощью итерационного метода начальных напряжений и комплекса условий, характеризующих изменение свойств пород по мере увеличения запредельных деформаций и соотношения главных напряжений.

6. Определение смещений пород вокруг выработки, расчетной нагрузки и параметров крепи. При этом несоответствие расчетных перемещений фактическим устраняется путем получения в характерных направлениях корреляционных зависимостей между относительными деформациями разупрочнения  $\varepsilon_p$  и коэффициентом трещинной пустотности пород. По мере накопления статистических данных в ходе наблюдения связь между ука-

занными величинами уточняется. В интервалах между замерами полученные зависимости используются для прогнозирования по результатам моделирования коэффициента трещинной пустотности  $k_{mp}$  во всей области массива, затронутой деформационными процессами. Путем интегрирования коэффициента  $k_{mp}$  по глубине ЗНД определяются суммарные раскрытия трещин по нескольким характерным радиальным направлениям, численно равные перемещениям точек контура, и строится новое положение породного обнажения, являющееся результатом деформирования пород.

Предлагаемая методика двухэтапного прогнозирования проявлений горного давления использована при проведении воздухоподающего уклона пласта  $l_1$  шахты им. XIX съезда КПСС ГП «Луганскуголь», а также 9-го западного конвейерного бремсберга пласта  $l_6^H$  шахты «Машинская» ш/у «Луганское». Применение разработанной методики позволило определить рациональные параметры установки крепи в этих выработках и обеспечить их безремонтное поддержание.

Таким образом, использование методики двухэтапного прогнозирования проявлений горного давления, использующей сочетание численного математического моделирования и результатов шахтных измерений, позволяет получать гибкое решение в зависимости от фактических условий проведения выработки, осуществлять выбор адекватных способов обеспечения устойчивости породного обнажения, уточнять априорно заданные исходные параметры состояния породного массива и его свойства. По сравнению с отраслевой методикой [5] такое моделирование позволяет воспроизвести присущие только данной выработке геомеханические процессы образования зоны разрушения пород в окрестности выработки с одновременным выполнением трех условий, гарантирующих адекватность моделирования: пространственное рассмотрение процесса перераспределения поля напряжений в зоне влияния забоя выработки; отражение реальной структуры породного массива с описанием его свойств по полной диаграмме деформирования пород для каждого элемента; максимально достоверное воспроизведение закономерностей образования зоны разрушения пород с учетом технологии горнопроходческих работ и воздействия крепи.

### **Библиографический список**

- 1. Ардашев К.А. Геомеханические основы рационального проектирования и строительства капитальных выработок / К.А. Ардашев // Шахтное строительство. – 1978. – № 1. – С. 9-13.*
- 2. Литвинский Г.Г. Область применения замкнутых конструкций крепи капитальных выработок / Г.Г. Литвинский, Г.В. Бабюк // Шахтное строительство. – 1980. – № 9. – С. 13-16.*

3. Литвинский Г.Г. Двухстадийное проектирование проведения выработок в условиях пучащих пород / Г.Г. Литвинский, Г.В. Бабиюк, Б.Н. Даниленко // Шахтное строительство. – 1983. – № 2. – С. 16-20.

4. Бабиюк Г.В. Системное обоснование и разработка адаптивных способов обеспечения надежности горных выработок: дис. докт. техн. наук : 05.15.04 : защ. 04.03.05 : утв. 08.06.05 / Бабиюк Геннадий Васильевич; Национальный горный университет. – Днепропетровск, 2005. – 522 с.

5. СОУ 10.1.00185790.011:2007. Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони. – К. : Вид-во Мінвуглепром України, 2007. – 118 с.

6. СНиП II94-80. Подземные горные выработки. Нормы проектирования. М. : Стройиздат, 1980. – 39 с.

7. Бабиюк Г.В. Моделирование деформационных процессов вокруг проводимой выработки при активном воздействии на породный массив / Г.В. Бабиюк, М.А. Диденко // Сб. научн. трудов «Разработка рудных месторождений». – Кривой Рог: КТУ, 2005. – № 89. – С. 108-112.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. Борзыхом А.Ф**