

- разделение в пространстве и во времени процессов добычи угля и дегазации массива;
- опережающая дегазация почвы отрабатываемого пласта и самого угольного пласта с использованием методов искусственного стимулирования газоотдачи;
- опережающая дегазация разгруженной зоны на сопряжении ранее отработанного и подготовленного к отработке выемочных столбов;
- высокая устойчивость и долговечность скважин для текущей дегазации, пробуренных вслед за прохождением забоя лавы.

Применение данной схемы дегазации углепородного массива при отработке угольных пластов, имеющих в почве газосодержащие источники, позволит повысить безопасность ведения горных работ и увеличить нагрузку на очистной забой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петухов И. М. Теория защитных пластов/ И. М. Петухов, А. М. Линьков. – М. : Недра, 1976. – 224 с.
2. Анциферов А. В. Эффективность использования защитных пластов для предотвращения газодинамических явлений / А. В. Анциферов, Д. И. Ходырев, В. А. Канин, А. В. Кузнецов // Уголь Украины. – 2002. – № 11. – С. 10 – 12.
3. Булат А. Ф. Концепция комплексной дегазации углепородного массива на шахте им. А. Ф. Засядько // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2003. – Вып. № 42. – С. 3 – 9.
4. Курносое С. А. Дегазация газонасыщенного углепородного массива при столбовой системе разработки пологих угольных пластов // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2008. – Вып. № 74. – С. 215 – 222.
5. Курносое С. А. Дегазация массива с повторным использованием газосборной выработки / С. А. Курносое, И. Н. Слащев, В. Н. Сапегин, П. Е. Филимонов // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2009. – Вып. № 83. – С. 15 – 158.
6. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР. – Л. : ВНИМИ, 1986. – 126 с.

УДК 622.831:622.261

Канд. техн. наук И. Н. Слащев,
(ИГТМ НАН Украины)

МЕТОД УЧЕТА ИЗБЫТОЧНЫХ ГАЗОВЫХ ДАВЛЕНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ СОВРЕМЕННЫМИ КОМПЬЮТЕРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

У статті запропонований метод урахування газових тисків у газонасиченому породному масиві і нова технологія комп'ютерного чисельного аналізу для його реалізації.

METHOD OF ACCOUNT THE EXCESS GAS PRESSURE WHEN SOLVING GEOMECHANICAL PROBLEMS USING MODERN COMPUTER TECHNOLOGIES

The authors propose method of account the gas pressures in massif gas-saturated rock and new technology of the computer numerical analysis for its implementation.

С переходом горных работ на глубины ниже зоны газового выветривания влияние фактора избыточных газовых давлений на напряженно-деформированное состояние породного массива существенно возрастает. Это связано, во-первых, с частичным ограничением или невозможностью выхода

газа на поверхность и возрастанием газовых давлений в пластах, во-вторых, с появлением возможности дренирования газа по техногенным магистральным трещинам в подземные выработанные пространства и снижением газовых давлений в локальных зонах массива. В результате породный массив испытывает дополнительные нагрузки и разгрузки от сил избыточного давления газа, имеющие, чаще всего, зональный характер, обусловленный расположением в пространстве пластов газонасыщенных пород и степенью их разрушения под влиянием горных работ.

В предельно напряженных породах газовый фактор может стать решающим для возникновения внезапных подвижек кровли и поднятий почвы горных выработок, отслоений больших объемов пород кровли, активизации динамических проявлений горного давления. Решение проблем прогноза длительной устойчивости выработок, повышения эффективности дегазации горных пород, качества планирования горных работ и управления горным давлением также связано с возможностью прогноза поведения газонасыщенного массива, точность которого зависит от корректности учета газовых давлений. Воздействие на породный массив газового давления исследовали, в основном, с точки зрения дегазации пластов, изменения проницаемости горных пород и оценки условий формирования выбросов угля, пород и газа в краевой части горных выработок для предотвращения этого опасного явления [1, 2]. Вместе с тем, прогноз напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива при совместном действии сил горного и газового давлений в условиях его высокой газонасыщенности затрагивается достаточно редко и имеет, несомненно, больше вопросов, чем ответов. В частности, недостаточно разработаны корректные методы прогноза состояния газонасыщенного массива и отсутствуют адекватные компьютерные технологии их реализации.

Основная идея предлагаемого метода состоит в использовании близкой физической сущности воздействия на породный массив горного и газового давлений в процессе его разупрочнения для их совместного учета в геомеханических моделях. При ведении горных работ горное давление в породах приводит к их всестороннему неравнокомпонентному сжатию или растяжению. Газовое давление действует только в трещинно-поровом пространстве с одинаковой интенсивностью во всех направлениях. Поэтому наибольшее влияние на характер деформирования породного массива давление газа оказывает в активный период сдвижений до 50-60 суток после обнажения, когда происходит интенсивное развитие трещиноватости и разупрочнение пород. В этот период горное и газовое давление снижаются. Если падение напряжений на интервале от начала неупругого деформирования до остаточной прочности представить коэффициентами изменения максимальных главных напряжений k_σ и давления газа k_p (изменяются от 0 при отсутствии напряжений до 1 в точке предела прочности) в зависимости от коэффициента изменения деформации k_ε за время разупрочнения породы t_g , рис. 1, то видно, что данные процессы имеют существенные отличия (при построении использованы результаты одновременного определения

величины напряжений в массиве с помощью метода локального гидроразрыва и измерения давления газа в скважинах [3]). Прочность пород снижается быстро в зависимости от их хрупкости (происходит развитие магистральных трещин), в то же время газовое давление сохраняется на достаточно высоком уровне в зависимости от фильтрационной способности массива. Так как развитие локальных трещин не влечет за собой полную потерю несущей способности, то разрушенные породы имеют остаточную прочность и сохраняют остаточный уровень напряжений. Давление газа, напротив, имеет тенденцию только к снижению и стремится к минимальному значению по причине фильтрации газа в выработанные пространства и горные выработки.

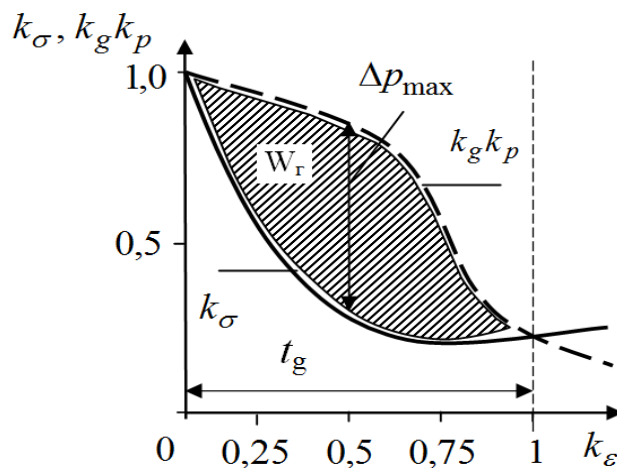


Рис. 1 – Изменения коэффициентов спада напряжений и давления газа при разрушении (для наглядности графики совмещены и показаны в сопоставимых координатах)

Коэффициент k_g характеризует отношение величины горного давления к величине газового давления в нетронутом массиве на глубине H . Так как избыточное газовое давление в нетронутом массиве определяется известной зависимостью $P \approx (0,8 \div 1,0)\gamma_g H$ (γ_g – плотность воды) [4], а горное давление $\sigma = \gamma H$ (γ – объемный вес вышележащих пород), то значение $1/k_g \approx 0,33 \div 0,48$.

НДС газонасыщенного породного массива зависит от степени трещиноватости горных пород, возникающей при ведении горных работ. При объемном сжатии трещины, в основном, прорастают вдоль линии действия наибольших сжимающих напряжений и перпендикулярно линии действия сил наименьшего сжатия или сил растяжения, рис. 2. Так как в окрестности края изолированной трещины, как правило, происходит плоская деформация, то с учетом давления газа p максимальные и минимальные главные напряжения будут равны соответственно $\sigma_1 + p$ и $\sigma_3 + p$. Выделим следующие случаи: при $\sigma_3 > p$ имеем случай всестороннего сжатия, рассматривается задача о совместном действии максимального сжимающего напряжения $\sigma_1 + p$ и минимального $\sigma_3 + p$; при $\sigma_3 < p$ имеем случай растяжения и дополнительного раскрытия трещин.

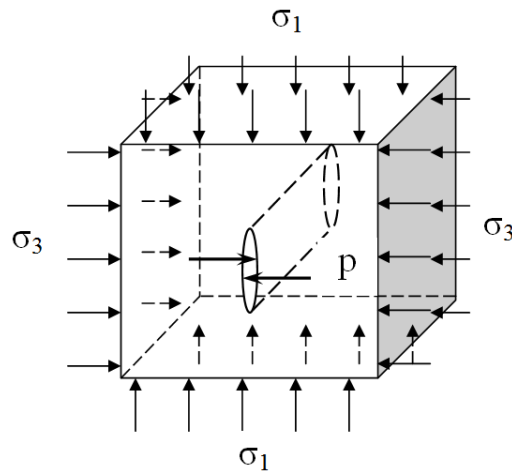


Рис. 2. – Схема совместного действия горного и газового давления в массиве с трещиной

Увеличение горного и газового давлений до величины, равной пороговому значению и выше сопровождается резким понижением прочности пород. В качестве критериев начала разрушения массива в области неравнокомпонентного сжатия может быть принято условие Кулона-Мора, а в области растяжения – соотношение $\tau_0/5 - p = 0$ (τ_0 - сцепление) [5], которые хорошо согласуются с экспериментальными результатами и не противоречат теории Гриффитса при оценке начала прорастания трещин на микроуровне. С учетом дополнительного давления газа критерий Кулона-Мора принимает вид

$$(\sigma_1 + p) - (\sigma_3 + p) \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - \sigma_{сж} = 0, \quad (1)$$

где φ – угол внутреннего трения, $\sigma_{сж}$ – прочность на одноосное сжатие.

Анализ критерия (1) показывает, что с возрастанием газового давления увеличивается неравнокомпонентность поля напряжений, так как максимальная компонента тензора напряжений возрастает на большую величину, чем минимальная. Поэтому переход газонасыщенных пород в неупругое состояние происходит при меньших значениях геостатических напряжений, при этом газ с высоким сорбционным потенциалом может приводить к разупрочнению пород вплоть до их полного разрушения. Очевидно, что критерий разрушения не связан с уравнениями равновесия, а является дополнительным условием при решении задач предельного состояния.

В условиях трещиноватых газонасыщенных пород невозможно получить точное аналитическое решение геомеханической задачи, поэтому в качестве основной технологии реализации предложенного метода рассмотрим компьютерное моделирование. Базовая технология компьютерного анализа включает реализацию заданной деформационной модели среды путем совмещения метода конечных элементов (МКЭ) и метода начальных напряжений (МНН) [6]. Основной принцип расчета заключается в повторении упругих решений до тех пор, пока найденные упругие деформации не будут равны деформациям, соот-

ветствующим заданному закону пластического течения. При этом деформационная модель в качестве граничных состояний может включать в себя как пластическое течение, так и хрупкое разрушение, что позволяет задавать любые промежуточные деформационные характеристики пород.

Так как МКЭ использует принцип возможных перемещений, согласно которому работа внешних сил равна работе внутренних напряжений (дискретный аналог закона сохранения энергии), то геомеханическая модель газонасыщенного породного массива может быть построена на основе совместной работы сил горного и газового давлений. Работа сил в модели равна произведению величины силы на величину перемещения точки приложения в направлении ее действия. Работа сил газового давления вносит свой вклад в разрушение массива, численно равный площади заштрихованной фигуры (рис. 1). Коэффициент увеличения работы газового давления k_{W_2} определяется из соотношения

$$k_g k_{W_2} = \int_0^1 [k_g k_p(k_\varepsilon) - k_\sigma(k_\varepsilon)] dk_\varepsilon. \quad (2)$$

Переходя к текущим значениям максимальных главных напряжений σ_1 и деформаций ε_1 модели на интервале от предельной упругой деформации ε_1^y до деформации в точке перехода к остаточной прочности $k_{nl}\varepsilon_1^y$, дополнительная работа газового давления в зоне разупрочнения

$$k_g W_2 = \int_{\varepsilon_1^y}^{k_{nl}\varepsilon_1^y} [k_g p(\varepsilon_1) - \sigma_1(\varepsilon_1)] d\varepsilon_1, \quad (3)$$

где k_{nl} – коэффициент, характеризующий степень пластичности породы (скорость падения напряжений в зоне разупрочнения); $p(\varepsilon_1)$ – функция снижения газового давления; $\sigma(\varepsilon_1)$ – функция снижения напряжений.

Снижение напряжений при разупрочнении до полного разрушения породы (точки перехода к остаточной прочности) зависит от свойств материала, но в любом случае соблюдается закономерность, чем прочнее материал, тем больше у него выражены хрупкие свойства. Применение коэффициента k_{nl} дает возможность задавать любую интенсивность спада нагрузки.

Обычно математическая модель строится на предположении, что снижение сопротивляемости породы на участке разупрочнения от предельного уровня напряжений σ_1^{np} до остаточного $\sigma_1^{ост}$ происходит линейно, а деформации при расчетном уровне напряжений определяются линейной интерполяцией по текущим значениям расчетных максимальных главных напряжений и деформаций в итерационной процедуре. Однако, как показано на рис. 1, процессы снижения прочности и давления газа носят выраженный нелинейный характер. Если кривые снижения горного и газового давлений в зоне разупрочнения диаграммы «напряжение-деформация» представить полиномами третьей степени

$$k_g W_z = \int_{\varepsilon_1^y}^{k_{nl} \varepsilon_1^y} \left[k_g \sum_{n=0}^{n=3} a_n \varepsilon^n - \sum_{n=0}^{n=3} b_n \varepsilon^n \right] d\varepsilon, \quad (4)$$

где a_n и b_n – регрессионные коэффициенты, задающие форму кривых падения газового и горного давлений соответственно (получены по фактическим данным с точностью $R^2=0,96 \div 0,99$, табл. 1).

Таблица 1 – Значения регрессионных коэффициентов

	a_0	a_1	a_2	a_3	b_0	b_1	b_2	b_3
Значения	1	-0,243	0,22	-0,811	1	-2,74	3,102	-1,166

Интегрируя соотношение (4) получим полную дополнительную работу газа при разупрочнении породы на участке от ε_1^y до $k_{nl} \varepsilon_1^y$:

$$\begin{aligned} k_g W_z &= k_{nl} \sum_{n=0}^{n=3} \frac{1}{n+1} k_g a_n \varepsilon_1^{y^{n+1}} - \sum_{n=0}^{n=3} \frac{1}{n+1} k_g a_n \varepsilon_1^{y^{n+1}} - k_{nl} \sum_{n=0}^{n=3} \frac{1}{n+1} b_n \varepsilon_1^{y^{n+1}} + \\ &+ \sum_{n=0}^{n=3} \frac{1}{n+1} b_n \varepsilon_1^{y^{n+1}} = k_{nl} k_g (a_0 \varepsilon_1^y + 0,5 a_1 \varepsilon_1^{y^2} + 0,33 a_2 \varepsilon_1^{y^3} + 0,25 a_3 \varepsilon_1^{y^4}) - k_g (a_0 \varepsilon_1^y + \\ &+ 0,5 a_1 \varepsilon_1^{y^2} + 0,33 a_2 \varepsilon_1^{y^3} + 0,25 a_3 \varepsilon_1^{y^4}) - k_{nl} (b_0 \varepsilon_1^y + 0,5 b_1 \varepsilon_1^{y^2} + 0,33 b_2 \varepsilon_1^{y^3} + 0,25 b_3 \varepsilon_1^{y^4}) + \\ &+ (b_0 \varepsilon_1^y + 0,5 \varepsilon_1^{y^2} + 0,33 \varepsilon_1^{y^3} + 0,25 \varepsilon_1^{y^4}) = k_g (k_{nl} - 1) (a_0 \varepsilon_1^y + 0,5 a_1 \varepsilon_1^{y^2} + 0,33 a_2 \varepsilon_1^{y^3} + \\ &+ 0,25 a_3 \varepsilon_1^{y^4}) - (k_{nl} - 1) (b_0 \varepsilon_1^y + 0,5 b_1 \varepsilon_1^{y^2} + 0,33 b_2 \varepsilon_1^{y^3} + 0,25 b_3 \varepsilon_1^{y^4}) = \\ &= (k_{nl} - 1) (\varepsilon_1^y (k_g a_0 - b_0) + 0,5 \varepsilon_1^{y^2} (k_g a_1 - b_1) + 0,33 \varepsilon_1^{y^3} (k_g a_2 - b_2) + 0,25 \varepsilon_1^{y^4} (k_g a_3 - b_3)); \quad (5) \end{aligned}$$

для текущего значения деформации в зоне разупрочнения

$$k_g W_z(\varepsilon) = k_g (k_{nl} - 1) (\varepsilon_1^y (k_g a_0 - b_0) + 0,5 \varepsilon_1^{y^2} (k_g a_1 - b_1) + 0,33 \varepsilon_1^{y^3} (k_g a_2 - b_2) + 0,25 \varepsilon_1^{y^4} (k_g a_3 - b_3)). \quad (6)$$

Компьютерная реализация данного метода состоит в следующем. При окончании итерационного процесса решения геомеханической задачи получаем значение напряжений σ_1 и деформаций ε_1 без учета давления газа, при этом состояние элементов модели оценивается по критерию (1). Для каждого элемента расчетной схемы вычисляется работа сил горного давления. Если деформация элемента попадает в зону разупрочнения $\varepsilon_1^y < \varepsilon_1 < k_{nl} \varepsilon_1^y$, то дополнительная работа, реализованная силами давления газа при текущем значении деформации ε_1 , рассчитывается по соотношению (6), а если $\varepsilon_1 > k_{nl} \varepsilon_1^y$, то учитывается полная работа по соотношению (5). Работы сил горного и газового давлений суммируются, вычисляется прирост напряжений и сил. Прирост сил автоматически распределяется между узлами расчетной схемы путем добавления к мат-

рице сил системы, устанавливается признак продолжения итераций. На каждой последующей итерации расчет приводит к увеличению напряжений и деформаций. Затем добавленные напряжения отнимаются путем обратных вычислений. Повторение итераций производится до тех пор, пока каждый элемент изучаемой схемы при рассчитанном значении напряжений не будет иметь деформацию, соответствующую деформационной модели насыщенной газом породы.

Таким образом, разработан метод и новая технология компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния пород, включающие учет внутрипластовых газовых давлений, которые применимы при отработке параметров горных работ на глубинах ниже зоны газового выветривания. Предложенный метод более полно учитывает физическую сущность деформационных процессов в газонасыщенном массиве горных пород, и, вследствие этого, обладает повышенной достоверностью прогноза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закономерности изменения газовой проницаемости горных пород при переходе их из равнокомпонентного объемного напряженного состояния в разнокомпонентное / В. Г. Перепелица, В. С. Кулинич, Г. А. Шевелев, В. В. Лукинов // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2004. – Вып №. 61. – С. 12 – 17.
2. Лукинов В. В. Моделирование процесса выброса угля и метана вблизи тектонических нарушений / В. В. Лукинов, А. П. Круковский, В. В. Круковская // Матер. междунар. конф. «Форум горняков – 2007». Днепропетровск: РИК НГУ, 2007. – С. 63 – 69.
3. Кулинич В. С. Влияние разгрузки и дегазации выбросоопасного массива песчаника на изменение его механических / В. С. Кулинич, Г. А. Шевелев // Уголь. – 1978. – № 3. – С. 26 – 27.
4. Аникиев К. А. Аномально высокие пластовые давления в нефтяных и газовых месторождениях / К. А. Аникиев. М. : Недра, 1964. – 361с.
5. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А. Б. Фадеев. – М. : Недра, 1987. – 221 с.
6. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 238 с.

УДК 553.17:622.357

Канд. геол. – мин. наук Л. Л. Шкуро,
вед. инж. Г. Н. Горбачева
(ИГТМ НАН Украины)

ОЦЕНКА ГАЗОНОСНОСТИ ПЕСЧАНИКОВ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ, С УЧЕТОМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОРИСТОСТИ И ВЛАЖНОСТИ

Встановлені кількісні критерії зміни пористості, вологості і ступеню заповнення пор газом, які пропонується враховувати при прогнозній оцінці газоносності пісковиків у вуглепородному масиві.

RATE OF GAS-CONTAIN OF SANDSTONES IS IN THE MOUNTAIN MAKING TAKING WITH INDICATOR ARE TAHE ACCOUNT OF POROSITY AND HUMIDITY

Are presented the quantitative criteria of change porosity, humidity and degree of filling of pores to gas, which it is leted to take into account a gas-contain of sandstones in a coalroch array.