

УДК 004, 622.831

Р.И. Мануйленко, Т.С. Хашан

Институт прикладной математики и механики НАН Украины, г. Донецк, Украина
khashan@mail.ru

Методика прогнозирования деформированного состояния анизотропного угольного пласта при сжатии вмещающими породами

Для систем автоматического оповещения на шахтах разработана методика прогноза отжима угля и проседания вмещающих пород. Учтена анизотропия пластических свойств разрабатываемого пласта, выполнены численные исследования деформированного состояния угля в призабойной части.

Введение

Анализ проблем ведения горнодобывающих работ показал, что на сегодняшний день безопасность работы шахтеров зависит от наличия интеллектуальных систем анализа и прогнозирования обстановки в шахтах, работающих в реальном режиме времени. Основная причина аварий и гибели людей в шахтах – внезапные выбросы газовой угольной пыли. Это связано с увеличением глубины добычи угля, что приводит к возрастанию влияния на состояние угольного пласта и вмещающих пород зон повышенного горного давления, которые формируются под действием как горно-геологических факторов, так и технологических параметров ведения горных работ. На сегодняшний день для прогнозирования выбросов газовой угольной пыли предлагаются: анализ данных смещения угольного пласта и газовыделения, построенный на натуральных экспериментах для конкретной шахты [1], [2], общие теоретические модели [3-7], геофизические и геомеханические методы контроля [8-10].

В данной работе предложена методика анализа и прогноза параметров проявления горного давления в очистных выработках на основе численно-аналитических исследований. В работах [1], [2] описаны результаты натуральных наблюдений в массиве, предложена методика оценки геомеханических параметрических процессов в угольном пласте в приконтурной зоне выработки. Смещение угольного пласта в сторону контура выработки и газовыделение определяется квадратичной аппроксимацией. Привязка к эмпирическим коэффициентам не позволяет спрогнозировать динамическое поведение угля и пород в реальном масштабе времени. Для обобщения данных в [3-7] проведены теоретические исследования. Использование модели массива горных пород как упругопластической среды предложено в статье [3]. В работах [4], [5] рассмотрен случай, когда на пласт со стороны пород действует максимальное касательное напряжение, в [6] – когда касательное напряжение на контакте пласта и пород постоянно. Общая формула для касательных напряжений на контакте пласта и пород с учетом анизотропии прочностных свойств угля предложена в [7], также здесь приведен метод нахождения напряжений. Следует отметить, что в указанных работах не рассма-

тривается решение задачи состояния краевой части угольного пласта в напряжениях и скоростях смещений. Решение указанной задачи и построение методики прогнозирования на основе ее решения позволит точно описать напряженно-деформированное состояние углепородного массива в окрестности области очистных работ.

Поэтому **целью исследования данной работы** является разработка методики прогнозирования напряженно-деформированного состояния угольного пласта, в частности, величины отжима угля и прогиба пласта и вмещающих пород.

Постановка задачи

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- решить задачу состояния краевой части угольного пласта в напряжениях и скоростях смещений на основе математической модели углепородного массива как анизотропной упругопластической среды;
- провести численные исследования физических процессов в массиве для систем оповещения в шахтах;
- разработать методику для автоматического прогнозирования отжима угля и прогиба пород.

Прогнозирование параметров отжима угля

Параметры отжима угля будем определять при следующих допущениях.

Считается, что при разработке угля краевая часть переходит в пластическое состояние. Угольный пласт как анизотропный пластический слой, сжатый вмещающими породами, которые являются жесткими и шероховатыми. На рис. 1 представлена схема разработки угольного массива, где l – длина пластической зоны пласта, $2h$ – его толщина.

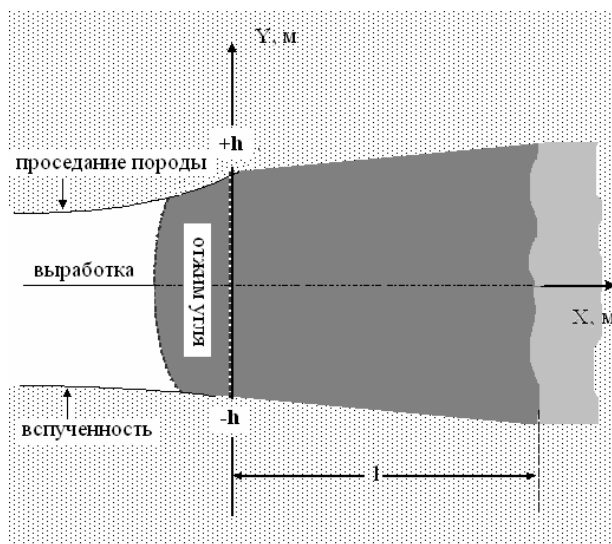


Рисунок 1 – Схема разработки угольного пласта

В месте выработки наблюдается проседание и вспученность породы. Давление породы на угольный пласт в граничной зоне (ось Y) и протекающие процессы газовой выделению по направлению к контуру выработки приводят к деформации угольного пласта, вследствие чего происходит отжим угля в сторону выработки.

Система уравнений, которая описывает состояние призабойной части пласта, включает [5], [7]:

– условие пластичности Мизеса – Хилла:

$$\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4g^2} + \tau_{xy}^2 = k^2, \quad (1)$$

– уравнения равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

– условие несжимаемости:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

и уравнение связи напряжений и деформаций:

$$g^2 \frac{\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)}{\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\tau_{xy}}, \quad (4)$$

где k – предел прочности угля при его сдвиге, σ_x , σ_y , τ_{xy} – компоненты тензора напряжений, u , v – скорости смещений вдоль осей x и y , g – коэффициент пластической анизотропии угля.

Общий вид граничных условий:

$$\begin{aligned} \sigma_y = 0; \tau_{xy} = 0; \quad x = 0; -h < y < h, \\ \tau_{xy} = \tau(x), v = v(x), \quad 0 < x < l, y = \pm h, \\ u = 0; v = 0; \quad x = l; -h < y < h \end{aligned} \quad (5)$$

Для решения задачи используется численный метод характеристик. Компоненты тензора напряжений, выраженные через функции σ и θ (6), удовлетворяют условию пластичности.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= g(\sigma - k \sin 2\theta), \\ \sigma_y &= g(\sigma + k \sin 2\theta), \\ \tau_{xy} &= k \cos 2\theta. \end{aligned} \quad (6)$$

Подставим (6) в уравнения равновесия (2) и добавим в систему выражения полных дифференциалов функций σ и θ . В результате получим систему 4 дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} g \frac{\partial \sigma}{\partial x} - 2gk \frac{\partial \theta}{\partial x} \cos 2\theta - 2k \frac{\partial \theta}{\partial y} \sin 2\theta &= 0, \\ g \frac{\partial \sigma}{\partial y} - 2k \frac{\partial \theta}{\partial x} \sin 2\theta - 2gk \frac{\partial \theta}{\partial y} \cos 2\theta &= 0, \\ d\sigma &= \frac{\partial \sigma}{\partial x} dx + \frac{\partial \sigma}{\partial y} dy \quad d\theta = \frac{\partial \theta}{\partial x} dx + \frac{\partial \theta}{\partial y} dy. \end{aligned} \quad (7)$$

Для получения уравнений характеристических линий напряжений определитель системы приравняем нулю.

$$\begin{vmatrix} dx & dy & 0 & 0 \\ 0 & 0 & dx & dy \\ g & 0 & -2gk \cos 2\theta & -2k \sin 2\theta \\ 0 & g & -2k \sin 2\theta & 2gk \cos 2\theta \end{vmatrix} = 0. \quad (8)$$

Уравнение имеет решение

$$\frac{dy}{dx} = -g \operatorname{ctg} 2\theta \pm \sqrt{1 + g^2 \operatorname{ctg}^2 2\theta}. \quad (9)$$

Аналогично найдем уравнения характеристик скоростей. Уравнения несжимаемости (3) и связи напряжений и скоростей (4) также запишем через функции σ и θ :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad -g \frac{\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right)}{\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)} = \operatorname{tg} 2\theta. \quad (10)$$

Добавим к ним выражения полных дифференциалов функций u и v :

$$du = \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy, \quad dv = \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy. \quad (11)$$

$$\begin{vmatrix} dx & dy & 0 & 0 \\ 0 & 0 & dx & dy \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ g \operatorname{ctg} 2\theta & 1 & 1 & -g \operatorname{ctg} 2\theta \end{vmatrix} = 0. \quad (12)$$

Это уравнение преобразовывается следующим образом:

$$(dx)^2 - 2g \operatorname{ctg} 2\theta dx dy - (dy)^2 = 0. \quad (13)$$

В общем случае уравнение имеет вид:

$$A(dx)^2 - 2B dx dy + C(dy)^2 = 0. \quad (14)$$

Для определения характеристических линий находим дискриминант $D = b^2 - ac$. Если $D > 0$, то уравнение имеет гиперболический тип и через каждую точку проходят 2 семейства характеристических линий. Если $D = 0$, то уравнение параболическое, и имеется только одно семейство характеристик, для $D < 0$ – уравнение эллиптического типа, характеристики мнимые.

В данном случае:

$$A = 1; B = -2g \operatorname{ctg} 2\theta; C = -1, \quad D = 1 + 4g^2 \operatorname{ctg}^2 2\theta > 0.$$

Отсюда

$$\frac{dy}{dx} = \frac{B \pm \sqrt{D}}{A} = -g \operatorname{ctg} 2\theta \pm \sqrt{1 + g^2 \operatorname{ctg}^2 2\theta}.$$

Найдем du и dv на характеристиках. Рассмотрим случай, когда

$$\frac{dy}{dx} = -g \operatorname{ctg} 2\theta + \sqrt{1 + g^2 \operatorname{ctg}^2 2\theta}.$$

Запишем вместо dy его выражение через dx , а производные v выразим через производные u из исходных уравнений. В результате получим:

$$\frac{du}{dx} = \left(2g^2 \operatorname{ctg}^2 2\theta - 2g\sqrt{1+g^2 \operatorname{ctg}^2 2\theta} + 1\right) \frac{\partial u}{\partial x} + \left(g \operatorname{ctg} 2\theta - \sqrt{1+g^2 \operatorname{ctg}^2 2\theta}\right) \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$\frac{dv}{dx} = \left(g \operatorname{ctg} 2\theta - \sqrt{1+g^2 \operatorname{ctg}^2 2\theta}\right) \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$\frac{du}{dv} = g \operatorname{ctg} 2\theta - \sqrt{1+g^2 \operatorname{ctg}^2 2\theta}.$$

Аналогично, при

$$\frac{dy}{dx} = -g \operatorname{ctg} 2\theta - \sqrt{1+g^2 \operatorname{ctg}^2 2\theta}$$

имеем

$$\frac{du}{dx} = \left(2g^2 \operatorname{ctg}^2 2\theta + 2g\sqrt{1+g^2 \operatorname{ctg}^2 2\theta} + 1\right) \frac{\partial u}{\partial x} + \left(g \operatorname{ctg} 2\theta + \sqrt{1+g^2 \operatorname{ctg}^2 2\theta}\right) \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$\frac{dv}{dx} = \left(g \operatorname{ctg} 2\theta + \sqrt{1+g^2 \operatorname{ctg}^2 2\theta}\right) \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$\frac{du}{dv} = g \operatorname{ctg} 2\theta + \sqrt{1+g^2 \operatorname{ctg}^2 2\theta}.$$

Итак, окончательно,

$$\frac{dy}{dx} = -g \operatorname{ctg} 2\theta \pm \sqrt{1+g^2 \operatorname{ctg}^2 2\theta} \quad \frac{du}{dv} = g \operatorname{ctg} 2\theta \mp \sqrt{1+g^2 \operatorname{ctg}^2 2\theta}. \quad (15)$$

Алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния угля и численные исследования

Определение компонент тензора напряжений и вектора скоростей смещений начнем с торца $x = 0$. На рис. 2 показана сетка из характеристических линий двух семейств. Вблизи торца $x = 0$ существует равномерное поле напряжений, далее из граничных условий (5) и дифференциальных соотношений (15) находим направления характеристических линий обоих семейств и напряжения в узловых точках.

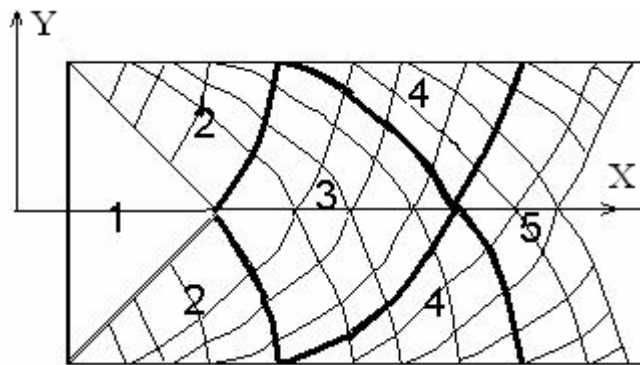


Рисунок 2 – Характеристические линии

Построение линий ведется до торца $x = l$. С этого торца производится расчет скоростей на уже известных узловых точках характеристических линий.

Касательные напряжения на контакте пласта и пород имеют вид [7]:

$$\tau(x) = \pm k \frac{cx}{\sqrt{c^2 x^2 + g^2}}, \quad (16)$$

величина c находится экспериментально и зависит от мощности угольного пласта и других свойств угля. Граничные условия на вертикальные перемещения определялись по замерам в точках на забое и на расстоянии 1,2 м и 2,3 м от него.

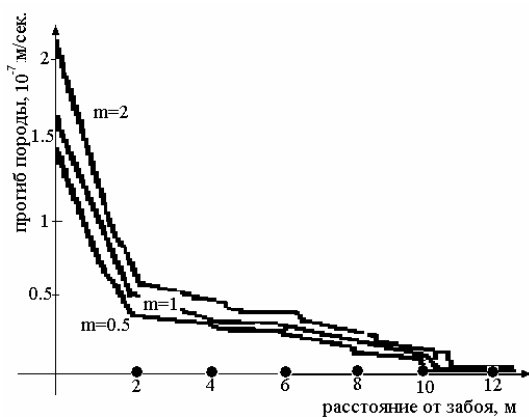


Рисунок 3 – Прогиб породы

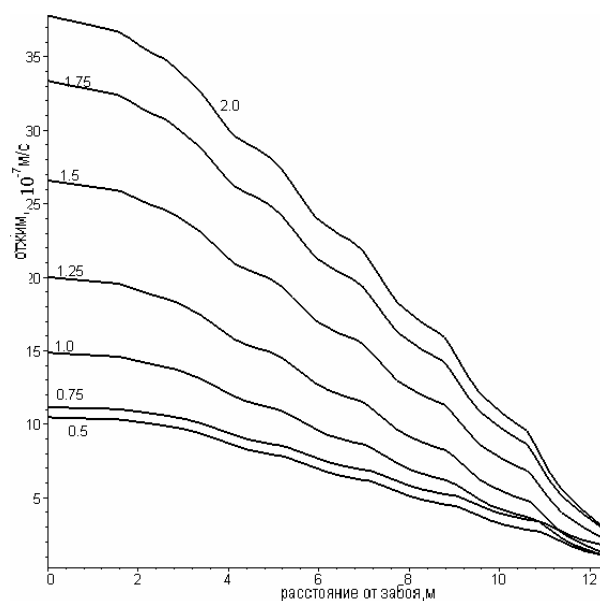


Рисунок 4 – Зависимость отжима угля от мощности пласта

На рис. 3 приведены значения скоростей прогиба пород на границе с угольным пластом в зависимости от его мощности, на рис. 4 – график отжима пластов различной мощности. Найденные параметры дают общую картину отжима угля и проседания боковых пород. Как следует из экспериментальных данных [2], прогиб пород существенно возрастает вблизи забоя. Исходные данные таковы:

$k = 0,1$ МПа, $g = 2$, глубина залегания угольного пласта 1000 м.

Из данных рис. 4 видно, что скорость отжима угля внутри пласта увеличивается практически равномерно.

Методика прогнозирования

Из всех физических предвестников, которые могут быть использованы для прогноза выбросоопасных зон, наиболее предпочтительными, с точки зрения перспектив автоматизации, являются параметры состояния призабойного массива, комплексно характеризующие напряженно-деформированное состояние, газосодержание, физико-механические и коллекторские свойства угля и вмещающих пород, реакцию на технологическое воздействие.

Для определения характера и проявлений горного давления устанавливаются датчики деформации и приборы для измерения газовыделения. Информация с датчиков поступает на операторский пульт, где происходит обработка данных и принятие решений. Управление может быть настроено на отдельный датчик или группу, на разную частоту замеров. Частота взятия замеров зависит от скорости подвигания забоев и характера проявления горного давления. Все замеры автоматически заносятся в память с регистрацией времени. Решение принимаются на основе сравнения данных, полученных с датчиков и прогнозных значений, построенных на графиках, соответствующие рис. 3 и 4.

В случае превышения значения отжима над прогнозными данными возникает сообщение оператору об ожидаемой критической ситуации.

Заключение

В работе рассмотрено решение задачи состояния краевой части угольного пласта в напряжениях и скоростях смещений. Решение указанной задачи и построение методики прогнозирования на основе ее решения позволило точнее описать напряженно-деформированное состояние угольного пласта в окрестности области очистных работ.

Проведены численные исследования. Анализ результатов показывает, что для пластов малой мощности (до 0,75 м) величина отжима будет практически одинаковой. Для более мощных пластов отжим будет большим, величина практически прямо пропорциональна мощности пласта. В работе не учтено действие метана на угольный пласт, однако если скорость отжима превысит прогнозируемую величину, то это может означать высокую газоносность угольного пласта, что может привести к выбросам и другим динамическим явлениям.

В будущем планируется рассмотреть напряженное состояние углепородного массива и вмещающих пород вокруг выработки с учетом найденных закономерностей, исследовать процессы образования и движения воды и метана, исследовать влияние метана на свойства угля.

Литература

1. Черняк И.Л. Управление состоянием массива горных пород / И.Л. Черняк, С.А. Ярунин. – М. : Недра, 1995.
2. Инженерные методы предотвращения газодинамических явлений : Монография / [Гребенкин С.С., Житленок Д.М., Керкез С.Д., Подкопаев С.В. и др.]. – Донецк, 2001. – 400 с.
3. Баренблатт Г.И. Обрушение кровли при горных выработках / Баренблатт Г.И., Христианович С.А. // Известия АН СССР. – 1955. – № 11. – С. 73-86.
4. Христианович С.А. Механика сплошной среды / Христианович С.А. – М. : Наука, 1981. – 484 с.
5. Хилл Р. Математическая теория пластичности / Хилл Р. – М. : Мир. – 416 с.
6. Соколовский В.В. Теория пластичности / Соколовский В.В. – М. : Высшая школа, 1969. – 608 с.
7. Левшин А.А. О решении типа Прандтля для анизотропного слоя / Левшин А.А., Мануйленко Р.И. // Тезисы докладов, ДонГУ. – 225 с.
8. Захаров В.Н. Исследования энергетических и спектральных характеристик колебательных процессов угольного пласта и вмещающих пород при проходке горных выработок / В.Н. Захаров, А.В. Харченко, П.Н. Гуляев // Физическая акустика. Распространение и дифракция волн. Геологическая акустика: сб. трудов XVI сессии Российского акустического общества. – М. : ГЕОС, 2005. – Т.1. – С. 342-347.
9. Иванов Б.М. Сейсмоакустическое сопровождение производственных процессов и газодинамических явлений в угольных шахтах / Иванов Б.М., Филиппов Ю.А., Индыло С.В. – 2007. – № 3. – С. 100-104.
10. Егоров П.В. Геомеханика : учебное пособие / [Егоров П.В., Штумпф Г.Г., Ренев А.А. и др.]. – Кемерово : КузГТУ, 2002. – 339 с.

Р.И. Мануйленко, Т.С. Хашан

Методика прогнозування деформованого стану анізотропного вугільного пласта при стисненні вміщувальними породами

Для систем автоматичного оповіщення на шахтах розроблена методика прогнозу віджимання вугілля та просідання навколишніх порід. Врахована анізотропія пластичних властивостей розроблювального пласта, виконані чисельні дослідження деформованого стану вугілля в призабійній частині.

R.I. Manuilenko, T.S. Khashan

The Method of Prognosis of Deformed State of Non-isotropic Coal Layer under Compression by Containing Rocks

The method of prognosis of quench of coal and bending of containing rocks is developed for the systems of automatic notification on mines. The non-isotropy of plastic properties of the developed layer is taken into account, numeral researches of the deformed state of coal are executed.

Статья поступила в редакцию 18.11.2009.