

УДК 622.24:539.194

Г. П. СТАРИКОВ, доктор техн. наук (ИФГП)  
 В. И. ПИЛЮГИН, доктор техн. наук (ДТЭК энерго)  
 О. Г. ХУДОЛЕЙ, канд. техн. наук (ИФГП)  
 Я. В. ШАЖКО, канд. техн. наук (ИФГП)  
 И. Г. СТАРИКОВА, канд. техн. наук (ИФГП)

## Оценка влияния скорости подвигания очистного забоя на интенсивность газовыделения

Показано, что время истечения метана из угольного массива и разрушенного угля функционально определяется уровнем фильтрационной составляющей массопереноса метана в угле и скоростью подвигания очистного забоя.

**Ключевые слова:** массоперенос метана, эффективная диффузия, газоотдача угля, скорость подвигания очистного забоя, интенсивность газовыделения.

**Контактная информация:** [hydoley63@mail.ru](mailto:hydoley63@mail.ru)

Решение задачи о влиянии скорости подвигания очистного забоя по простиранию пласта на интенсивность газовыделения из угольного массива связано с необходимостью учета уровня давления метана в призабойной зоне, обусловленной эпюрой горного давления, определяющей (при прочих равных условиях) кинетику массопереноса метана в трещиновато-пористой структуре угля.

На основании теоретических исследований и экспериментальных данных [1, 2] в призабойной части пласта можно выделить три характерных участка различного объемного нагружения и геомеханического состояния (рис. 1).

*Первый участок* объемного нагружения угольного пласта в глубине массива вне зоны влияния выработки (I, рис. 1) характеризуется тем, что три главных напряжения связаны соотношениями  $\sigma_1 = p_1 < 0$ ,  $\sigma_2 = \sigma_3 = \lambda p_1$  (где  $p_1$  – максимальное сжимающее давление на пласт в зоне «нетронутого» массива;  $\lambda$  – коэффициент бокового распора). При этом используется гипотеза о геостатическом напряженном состоянии, реализующемся в зоне нетронутого массива. В соответствии с полученными соотношениями между главными напряжениями параметр Надаи–Лоде  $\mu_\sigma = -1$ , что свидетельствует о виде объемного напряженного состояния обобщенного сжатия для этой зоны нагружения.

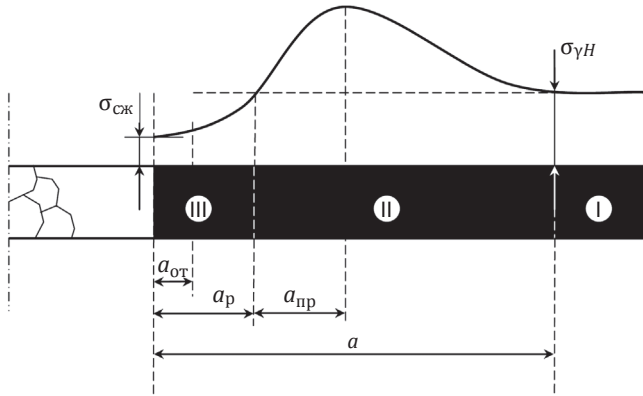
*Второй участок* объемного нагружения угольного пласта в глубине массива (II, рис. 1), где начинается частичное разрушение и сжима-

ющие напряжения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  достигают наибольших значений, характеризуется тем, что максимальное сжимающее напряжение  $\sigma_1$  достигает значения горного давления  $K_k p_1$  (где  $K_k$  – концентратор напряжения); минимальное сжимающее напряжение изменяется в пределах от  $\lambda p_1$  до  $\sigma_{сж}$ , а промежуточное главное напряжение  $\sigma_2$  достигает полусуммы  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ . Значительно отличается от единицы и приближается к нулю  $\mu_\sigma$ . Это свидетельствует о том, что на втором участке нагружения угольного пласта вид напряженного состояния близок к обобщенному сдвигу.

*Третий участок* объемного нагружения угольного пласта (III, рис. 1) – часть забоя, где минимальное сжимающее напряжение  $\sigma_{сж}$  стремится к нулю, а соотношение между двумя другими главными напряжениями зависит от условий разрушения угольного пласта между вторым и третьим участками нагружения. Для угольных пластов максимальное сжимающее напряжение  $\sigma_1$  на кромке забоя в отдельных случаях может снижаться до уровня промежуточного главного напряжения  $\sigma_2$ , что свидетельствует о реализации обобщенного растяжения.

Отметим, что разрушение и разупрочнение краевой части угольного пласта происходит при разгрузке вследствие выемки очередной полоски угля в лаве.

По своей структуре третий участок включает зону отжима  $a_{от}$ , глубина которой для углей средней стадии метаморфизма, как правило, не



**Рис. 1.** Распределение напряжений в краевой части пласта:  $\sigma_{сж}$  – минимальное сжимающее напряжение;  $\sigma_{\gamma H}$  – максимальное сжимающее напряжение на пласт в зоне нетронутого массива;  $a_{от}$  – зона отжима;  $a_р$  – зона разгрузки;  $a_{пр}$  – зона предельного состояния;  $a$  – зона опорного давления.

превышает 1–1,5 м, а давление метана в среднем снижается до  $P \approx P_{пл}$  (где  $P_{пл}$  – давление метана в нетронутом массиве, так называемое пластовое давление [3]).

В остальной части третьего участка (переходная часть эпюры на границе с зоной отжима) из-за снижения проницаемости угольного массива вследствие роста горного давления  $K_{кр}p_1$  сохраняет высокую метаноемкость угля. Из работы [4] следует, что давление газа в этой части эпюры может составить

$$P - P_{пл} = [3P_{пл} / (4G)] (K_{кр}p_1 - P_{пл}), \quad (1)$$

где  $G$  – модуль сдвига угля.

Оценка  $P$  для глубин залегания пологих угольных пластов  $H = 800 \dots 1300$  м свидетельствует о том, что его значение может на 15–55 % превышать пластовое давление. Согласно работе [5] это приведет к возрастанию фильтрационной составляющей коэффициента массопереноса метана в угле, имеющей вид

$$D_f = [Ke^{-(K_{кр}p_1/\sigma_c)/\mu}] P_{пл}, \quad (2)$$

где  $K$  – коэффициент проницаемости угля,  $m^2/c$ ;  
 $\mu$  – динамическая вязкость метана,  $МПа \cdot c$ ;  
 $\sigma_c$  – прочность угля на одноосное сжатие,  $МПа$ ;  
 $P_{пл}$  – давление метана в нетронутом массиве,  $МПа$ .

Анализ формулы (2) показывает, что фильтрационная составляющая процесса десорбции метана из угля – наиболее информативный показатель, учитывающий одновремен-

но внешнее и внутреннее состояние системы уголь–газ.

Вхождение в переходную зону с высокой метаноемкостью угля интенсифицирует процесс массопереноса метана как с поверхности обнажаемого массива, так и разрушенного угля. Вследствие этого согласно работе [6] суммарная интенсивность метановыделения составит

$$m(t) = (P_{пл}/P_a B) \sqrt{\gamma D_f / (\pi t + T)} + [12P_{пл} v_{пр} / (P_a B r_{пр})] \left( \sqrt{\gamma D_f l / (\pi v_{кр})} + \sqrt{\gamma D_f L_{кр} / (\pi v_{л})} \right), \quad (3)$$

где  $P_{пл}$  – давление метана в угольном пласте; определяется с помощью шахтного измерителя массопереноса метана ДС-03,  $МПа$ ;

$P_a$  – атмосферное давление,  $МПа$ ;

$B$  – ширина рабочего пространства очистной выработки,  $м$ ;

$\gamma$  – пористость угля, %;

$D_f$  – фильтрационная составляющая коэффициента массопереноса метана в угле,  $m^2/c$ ;

$t = 2 \dots 2,5$  мин – время формирования стационарного потока метана из обнаженной поверхности угольного забоя;

$v_{пр}$ ,  $v_{кр}$  и  $v_{л}$  – скорость среднесуточная подвигания очистного забоя, скорость движения скребкового конвейера и движения ленты ленточного конвейера,  $м/с$ ;

$r_{пр}$  – размер фракции угля,  $м$ ;

$l$  – длина лавы,  $м$ ;

$L_{кр}$  – длина ленточного конвейера,  $м$ .

При этом концентрацию метана и время ее формирования в объеме очистной выработки определяют по формулам

$$C_s = m(t) / [m(t) + q], \quad (4)$$

$$t_{кр} = C_{доп} / m(t), \quad (5)$$

где  $C_{доп}$  – допустимая концентрация метана по ДНАОП [7], %;

$q$  – интенсивность проветривания  $1 \text{ м}^3$  объема выработки,  $\text{мин}^{-1}$ .

Из анализа представленной методологии следует, что при высокой интенсивности метановыделения (порядка  $10^{-2} \text{ мин}^{-1}$ ), которое наблюдается в лавах, обрабатывающих пласты с природной газоносностью  $Q > 20 \text{ м}^3/\text{т}$  с.б.м., предельная концентрация метана, как правило, превышает допустимую с минимальным временем образования.

Чтобы исключить такую ситуацию, необходимо для каждого конкретного забоя устано-

вить оптимальный темп работы  $t_{\max}$  добычно-го оборудования. При этом для определения коэффициента фильтрации метана в угле и его пористости  $\gamma$  проводят измерения в очистном забое прибором ДС-03 [8].

Исходя из геомеханического состояния краевой части пласта (см. рис. 1), граница зоны  $Z$ , разграничивающая зону отжима и локальную область газонасыщенного угольного массива, перемещается по простиранию пласта согласно закону

$$Z = \sqrt{D_f t_{\max} / (\pi \gamma)}. \quad (6)$$

В то же время очистной забой подвигается по простиранию в соответствии с линейным законом  $y = v_{\text{п}} t_{\max}$ .

Условие, при котором зона отжима пересечет границу с повышенными параметрами массопереноса метана в угле, определяется из уравнения  $Z = y$ . В этом случае

$$t_{\max} = D_f / (\pi \gamma v_{\text{п}}^2). \quad (7)$$

При  $t < t_{\max}$  добыча угля практически не влияет на скорость газовой выделености из пласта (но, конечно, увеличивает газовой выделености из отбитого угля); если же  $t > t_{\max}$ , то газовый поток с единицы площади обнаженной поверхности стабилизируется на высоком уровне:

$$j_{\max} = \rho_0 \gamma v_{\text{п}}, \quad (8)$$

где  $\rho_0$  – плотность метана, г/см<sup>3</sup>.

Таким образом, если  $t > t_{\max}$ , то во время добычи угля газоотдача из пласта значительно увеличивается. В связи с этим время  $t_{\max}$  можно назвать максимальным временем безопасной непрерывной добычи угля.

Из формулы (7) видно, что при большом коэффициенте фильтрации, т. е. для высоконарушенных углей, время  $t_{\max}$  может увеличиваться до суток, поэтому добыча угля даже с высокой скоростью подвигания забоя (10 м/сут и более) реально не повлияет на газоотдачу из пласта.

**Выводы.** Разработаны научные основы оценки времени газоотдачи из разрушенного угольного массива, учитывающей закономер-

ности изменения фильтрационной составляющей процесса массопереноса метана в поровой структуре угля и скорость подвигания линии очистного забоя. Применение разработанного методического подхода позволит сформировать новые правила определения допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору и создать новую технологию отработки высокогазоносных угольных пластов с исключением возможности загазирования выработок.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Петухов И. М. Расчетные методы в механике горных ударов и выбросов: справ. пособие / [И. М. Петухов, А. М. Линьков, В. С. Сидоров и др.] – М.: Недра, 1992. – 256 с.
2. Докукин А. В. Моделирование предельно-напряженного состояния угольных пластов / А. В. Докукин, С. Е. Чирков, Б. К. Норель. – М.: Наука, 1981. – 148 с.
3. Алексеев А. Д. Прогноз времени образования опасных концентраций метана в очистных забоях / [А. Д. Алексеев, Э. П. Фельдман, Г. П. Стариков и др.] // Уголь Украины. – 2010. – № 7. – С. 29–32.
4. Фельдман Э. П. Перераспределение метана в призабойной зоне угольного пласта / Э. П. Фельдман, Г. П. Стариков, Н. А. Калугина, Е. А. Навка // Наук. праці УкрНДМІ НАН України. – 2013. – № 13. – С. 85–99.
5. Стариков Г. П. Геофильтрационная оценка параметров зоны разгрузки призабойной части угольных пластов / [Г. П. Стариков, В. В. Завражин, О. Г. Худолей и др.] // Физико-технические проблемы горного производства / ИФГП НАН Украины. – 2013. – Вып. 16. – С. 152–162.
6. Пат. 105870 Україна, МПК (2014.01) E21F 5/00. Спосіб визначення допустимого навантаження на очисний вибій / В. Г. Грін'юв, Е. П. Фельдман, Г. П. Стариков, Н. О. Калугіна, Ш. В. Мамлеєв, Л. М. Прокоф'єва, І. Є. Кольчик; заявник і патентовласник ІФГП НАН України. – № а 201307863; заявл. 20.06.13; опубл. 25.06.14, Бюл. № 12.
7. Безопасное ведение работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям: ДНАОП 1.1.30–1.XX.04. – К., 2004. – 195 с.
8. Пилюгин В. И. Совершенствование нормативной базы в области проектирования проветривания и дегазации очистных забоев / В. И. Пилюгин, Г. П. Стариков // Уголь Украины. – 2013. – № 8. – С. 40–43.