

УДК 622.831: 622.537.86

Э.П. Фельдман, Н.А. Калугина, О.В. Чеснокова

## ИЗМЕНЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА В ОКРЕСТНОСТИ МАГИСТРАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ РАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ ЗАБОЯ

Институт физики горных процессов НАН Украины,  
49600, г. Днепр, ул. Симферопольская, 2-а.

*Исследована динамика изменения давления газа в окрестности магистральной трещины, находящейся в краевой части газонасыщенного угольного пласта в случае стационарного подвигания забоя. Получены закономерности изменения этого давления от физико-химических свойств угля и геотехнологических параметров обработки пласта.*

**Ключевые слова:** трещина, угольный пласт, газ, давление, фильтрация, подвигание забоя.

Нетронутый газонасыщенный угольный пласт содержит трещины, в полости которых находится газ, давление которого  $P_0$  противостоит воздействиям напряжений, обусловленных горным давлением. Зажатые этими сжимающими напряжениями, трещины не развиваются. При разработке пласта, напряжения, поперечные по отношению к обнаженной поверхности, почти исчезают. Горное давление становится неоднородным - возникает опорное давление. Разгрузка приводит к процессу развития трещин, в основном плоскость залегания которых параллельна обнаженной поверхности, поскольку трещины иной ориентации по-прежнему «задавлены» сжимающим горным давлением. Рост трещин может привести к спонтанному разрушению призабойного участка газонасыщенного угольного пласта и сопровождаться внезапным выбросом угля, породы и газа. Подобное явление, спровоцированное быстрой разгрузкой угольного пласта, исследовано в [1]. При этом получены оценочные критерии реализации и времени разрушения краевого участка пласта. В [2] начато исследование процессов разрыва краевой части угольного/породного пласта природными газонаполненными трещинами как явлений, подготавливающих и инициирующих внезапные выбросы угля, породы и газа при стационарном подвигании забоя. Применение теории Гриффитса разрушения хрупких материалов позволило исследовать в [2] эволюцию трещин в краевой части угольного пласта, происходящую по мере движения поверхности забоя с постоянной скоростью. Для случая отсутствия фильтрации

газа получен критерий разрыва пласта трещиной, позволяющий учесть динамику напряженного состояния пласта, его свойства, пластовое давление газа, размеры трещин, скорость продвижения забоя. Выполнение этого критерия позволяет оценить время, при котором произойдет скачкообразный рост трещины. В данной работе мы рассмотрим влияние фильтрации газа, содержащегося в угольном пласте, что позволит в дальнейшем учесть изменчивость разрывающей нагрузки на берега трещины, уточнить темп ее эволюции. Как и в [1, 2], будем использовать идею «среднего» поля (mean field approximation), которая позволяет вместо системы трещин рассматривать одну, магистральную трещину, а остальные трещины формируют среднее поле напряжений в окружении магистральной трещины и служат резервуаром газа, для обмена этим газом окружения с выделенной трещиной.

Рассмотрим магистральную трещину, находящуюся в момент времени, выбранный в качестве начального ( $t = 0$ ) на расстоянии  $l$  от рабочей поверхности забоя (рис.1).

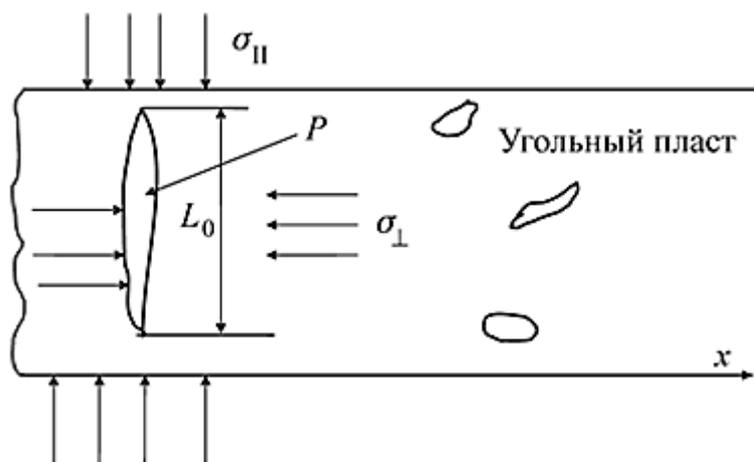


Рис. 1. Схема расположения трещин в газонасыщенном угольном пласте

В [1] мы пренебрегли фильтрацией газа, содержащегося в пласте. Эта фильтрация происходит как через поверхность забоя, так и через поверхность трещины. При выходе газа из пласта в выработанное пространство, давление газа всюду в пласте, в том числе и в окрестности трещины, уменьшается. В свою очередь, это приводит к появлению термодинамической силы, именно, разности давлений в самой трещине и в ее окружении, приводящей к истечению газа из полости трещины. Давление газа в трещине падает, а это уже напрямую снижает возможность развития трещины. Чтобы определить давление газа  $P(\tau)$  в полости трещины, необходимо предварительно выяснить, как меняется со временем давление газа  $P_e(\tau)$  в угольной матрице вблизи трещины.

С этой целью рассмотрим уравнение, которому подчиняется давление газа в угольном пласте в функции координаты и времени:

$$\frac{\partial P_e(x,t)}{\partial t} = D_f \frac{\partial^2 P_e(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

Здесь  $D_f$  - коэффициент фильтрации газа, характеризующий проницаемость угля при фильтрации метана.

Уравнение (1) диффузионного типа, которому подчиняется давление газа при его вязком течении (кнудсеновское течение). Полученные далее выводы остаются справедливыми и при другом типе течения газа.

Начальное условие к этому уравнению состоит в том, что в начальный момент ( $t = 0$ ) давление газа всюду одинаково и равно  $P_0$ , то есть пластовому давлению в нетронутом пласте

$$P_e(x, 0) = P_0 \quad (2)$$

Естественные граничные условия – это равенство нулю давления на поверхности забоя, и стремление давления к  $P_0$  при больших  $x$ :

$$P_e(0, t) = 0, \quad P_e(\infty, t) = P_0. \quad (3)$$

Далее давление будем измерять в единицах  $P_0$ . Вид уравнения при этом остается прежним, а начальное и граничные условия приобретают вид:

$$p_e(x, 0) = 1; \quad p_e(0, t) = 0; \quad p_e(\infty, t) = 1. \quad (4)$$

Решение этой задачи можно получить, например, путем применения преобразования Лапласа:

$$p_e(x, t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\exp\left(-\frac{tD_f y^2}{x^2}\right) \sin y \, dy}{y}. \quad (5)$$

Теперь примем к сведению, что забой движется со скоростью  $v$ . Расстояние  $x$  между забоем и трещиной равно  $l - vt$ . Подставляя  $x = l - vt$  в (5), введя безразмерный параметр

$$b \equiv \frac{D_f}{lv} \quad (6)$$

и выражая результат через безразмерное время  $\tau \equiv \frac{vt}{l}$ , приходим к формуле, определяющей зависимость от времени пластового давления газа вблизи трещины:

$$p_e(x, t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\exp\left(-\frac{b \tau y^2}{(1-\tau)^2}\right) \sin y \, dy}{y} \quad (7)$$

Отметим особую роль параметра  $b$ , определяющего скорость выхода метана из окружающего трещину материала. Этот параметр становится малым при слабой фильтрации и большой скорости подвигания забоя. Для получения количественных результатов выполним асимптотический анализ формулы (7).

Из справочной математической литературы [3] известно, что

$$\frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\exp\left(-\frac{b \tau y^2}{(1-\tau)^2}\right) \sin y \, dy}{y} = \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{a}}\right), \quad (8)$$

где  $\operatorname{erf}(x)$  – функция ошибок.

Применительно к нашей задаче, используя (8) и (7), получим следующее выражение для давления газа в окрестности магистральной трещины:

$$p_e(\tau) = \operatorname{erf}\left(\frac{1-\tau}{2\sqrt{b\tau}}\right). \quad (9)$$

Асимптотики функции  $\operatorname{erf}(x)$  при малых и больших значениях ее аргумента хорошо известны. Из них следует, что

$$\left\{ \begin{array}{l} p_e(\tau) \approx \frac{1-\tau}{\sqrt{\pi} \sqrt{b\tau}}, \text{ если } \frac{1-\tau}{2\sqrt{b\tau}} \ll 1, \text{ и} \end{array} \right. \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p_e(\tau) \approx 1 - \frac{2\sqrt{b\tau}}{\sqrt{\pi}(1-\tau)} \cdot \exp\left(-\frac{(1-\tau)^2}{4b\tau}\right), \text{ если } \frac{1-\tau}{2\sqrt{b\tau}} \gg 1 \end{array} \right. \quad (11)$$

Рассмотрим отдельно поведение  $p_e(\tau)$  для малых  $b$  (медленная фильтрация,  $b \ll 1$ ) и больших  $b$  (быстрая фильтрация,  $b \gg 1$ ).

1. В случае медленной фильтрации не только  $b \ll 1$ , но и  $b\tau \ll 1$  при всех  $\tau$ , поскольку  $\tau < 1$ . Поэтому нормированное давление  $p_e(\tau)$  «прижимается» к единице, то есть давление экспоненциально близко к  $P_0$ , согласно (11), почти для всех  $\tau$ , за исключением  $\tau$  близких к единице, когда

$$1 - \tau < 2\sqrt{b}. \quad (12)$$

Начиная с достижения этого критического момента, когда

$$1 - \tau = 1 - \tau_e = 2\sqrt{b},$$

давление  $p_e(\tau)$  спадает до нуля почти по линейному закону,

$$p_e(t) \approx \frac{1-\tau}{\sqrt{\pi b}}. \quad (13)$$

2. В случае быстрой фильтрации давление в окрестности трещины близко к нулю, точнее  $p_e(t) \sim \frac{1}{b}$ , почти для всех  $\tau$ , за исключением  $\tau < \frac{1}{b}$ , когда давление  $p_e(t)$  близко к единице. Иными словами, можно считать, что давление чрезвычайно быстро на временном интервале  $0 \leq \tau < \frac{1}{b}$  спадает от  $P_0$  до нуля.

На рис. 2 изображены зависимости  $p_e(t)$  для трех разных значений  $b$ . Они иллюстрируют и подтверждают вышеприведенные результаты асимптотического анализа.

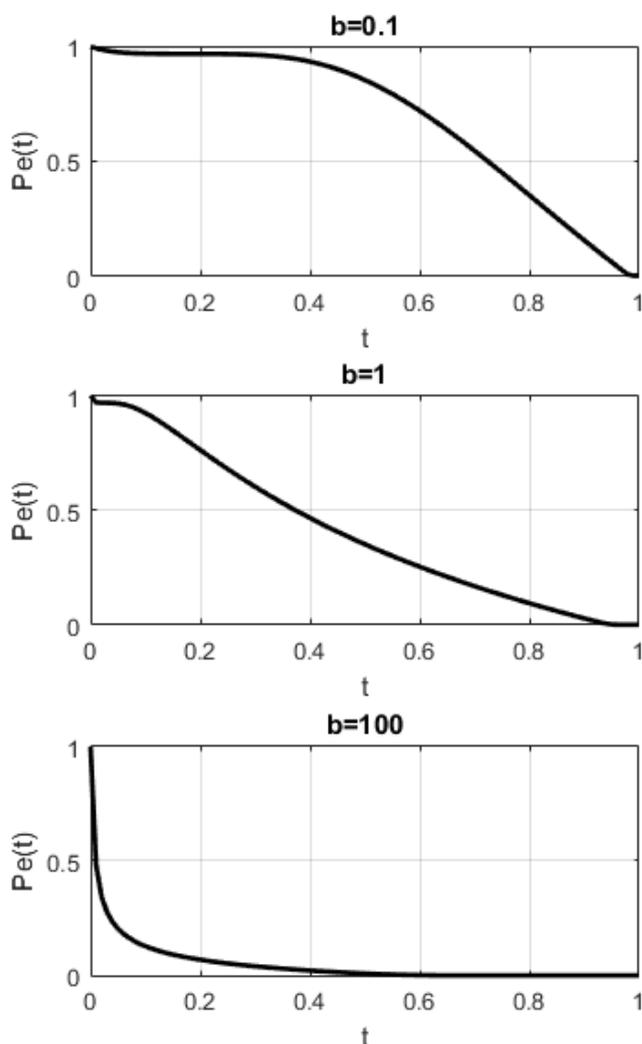


Рис. 2. Изменение давления в окрестности трещины с течением времени

Ітак, при будь-якій швидкості фільтрації тиск газу в околицях тріщини внаслідок (почти рівно)  $P_0$ , тиск в порожнині тріщини також дуже близько до  $P_0$ . На цьому інтервалі витікання газу в вироблене простір не впливає на тиск в околицях тріщини і в її порожнині. На наступному етапі виникає термодинамічна сила, різниця тисків  $p(\tau) - p_e(\tau)$  в порожнині тріщини і в її околицях, і тиск в тріщині падає.

Таким чином, отримані закономірності зміни тиску газу в околицях магістральної тріщини при стаціонарному підвиганні забою. Це дозволить в подальшому, дослідив закономірності зміни тиску газу в її порожнині, встановити умови, при яких ріст магістральної тріщини може призвести до спонтанного руйнування призабойної частини газонасиченого вугільного пласта, що дозволить вибрати економічно вигідну і, разом з тим, безпечну по вибуховій швидкості обробки пласта з урахуванням його фізико-хімічних властивостей і геотехнологічних характеристик обробки.

1. *Фельдман Э.П.* Роль разгрузки и фильтрации газа в процессе развития магистральных трещин в угольном пласте / Э.П. Фельдман, Н.А. Калугина, Т.Н. Мельник // Прикладная механика и техническая физика. - 2017. - Т. 58(1). - С. 155-164.
2. *Фельдман Э.П.* Эволюция трещин в краевой части угольного пласта при его стационарной обработке / Э.П. Фельдман, Н.А. Калугина, О.В. Чеснокова // Min. miner. depos. 11(2): 41-45. <https://doi.org/10.15407/mining11.02.041>
3. *Прудников А.П.* Интегралы и ряды: Том 1. / А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, О.Н. Маричев. М.: «Наука», 1981.

*Е.П. Фельдман, Н.О. Калугина, О.В. Чеснокова*

## ЗМІНА ТИСКУ ГАЗУ В ОКОЛІ МАГІСТРАЛЬНОЇ ТРІЩИНИ ПРИ РІВНОМІРНОМУ РУСІ ВИБОЮ

Досліджено динаміку зміни тиску газу в околицях магістральної тріщини, що знаходиться в крайовій частині газонасиченого вугільного пласта у випадку стаціонарного посування вибою. Отримано закономірності зміни цього тиску від фізико-хімічних властивостей вугілля і геотехнологічних параметрів відпрацювання пласта.

**Ключові слова:** тріщина, вугільний пласт, газ, тиск, фільтрація, посування вибою.

*E.P. Feldman, N.O. Kalugina, O.V. Chesnokova.*

**CHANGE OF GAS PRESSURE, AROUND OF THE MAIN CRACK IN  
UNIFORM MOTION OF COAL BACKWALL**

Filtration dynamics of gas pressure in the vicinity of a main crack located at the edge of a gas-saturated coal bed is studied in the case of steady face advance. The regularities of pressure changes with respect to the physical and chemical characteristics of coal and well-field performance parameters of the bed are established.

**Keywords:** crack, coal-bed, gas, pressure, filtration, advancement of coal backwall.