

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,  
49005, 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 отработки 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, поз-



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

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

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

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 (26), 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.

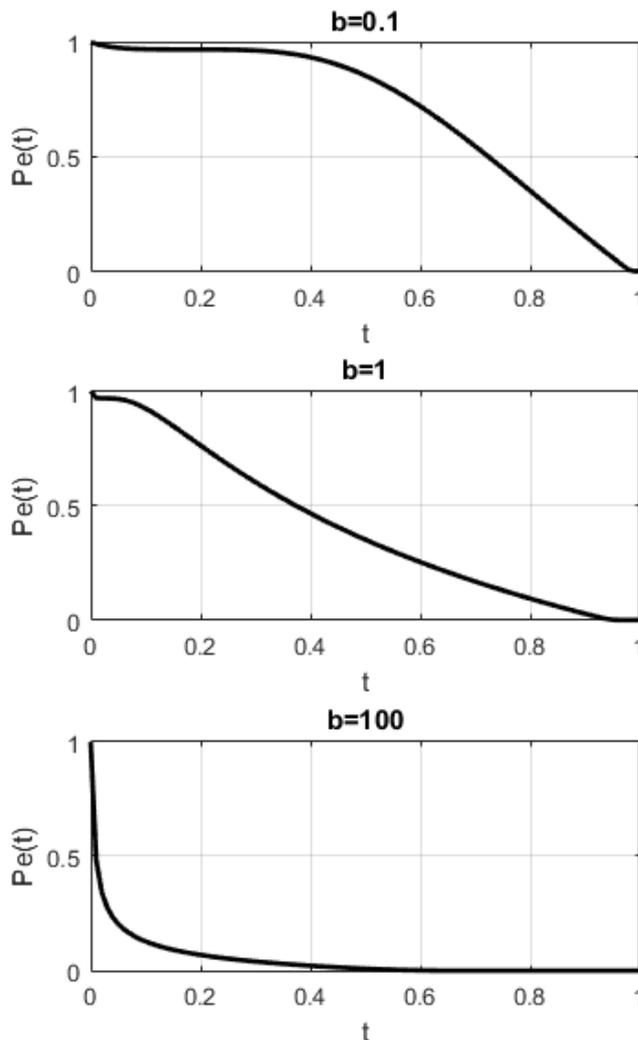


Рис. 2. Изменение давления в окрестности трещины с течением времени

Итак, при любой скорости фильтрации давление газа в окрестности трещины вначале равно (почти равно)  $P_0$ , давление в полости трещины также очень близко к  $P_0$ . На этом интервале истечение газа в выработанное пространство не сказывается на давлении в окрестности трещины и в ее полости. На следующем этапе возникает термодинамическая сила, разность давлений  $p(\tau) - p_e(\tau)$  в полости трещины и в ее окрестности, и давление в трещине падает.

Таким образом, получены закономерности изменения давления газа в окрестности магистральной трещины при стационарном продвижении забоя. Это позволит в дальнейшем, исследовав закономерности изменения давления газа в ее полости, установить условия, при которых рост магистральной трещины может привести к спонтанному разрушению призабойной части газонасыщенного угольного пласта, что позволит выбрать экономически целесообразную и, вместе с тем, безопасную по выбросу скорость обработки пласта с учетом его физико-химических свойств и геотехнологических характеристик обработки.

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 околі магистральної 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.