

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-

воляющий 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).

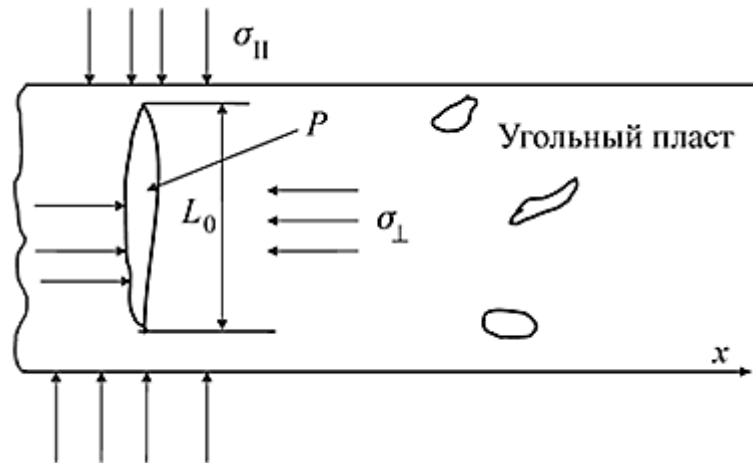


Рис. 1. Схема расположения трещин в газонасыщенном угольном пласте

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

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

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 τ , 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 τ , за исключением τ близких к единице, когда

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

Начиная с достижения этого критического момента, когда

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

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 τ , 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.

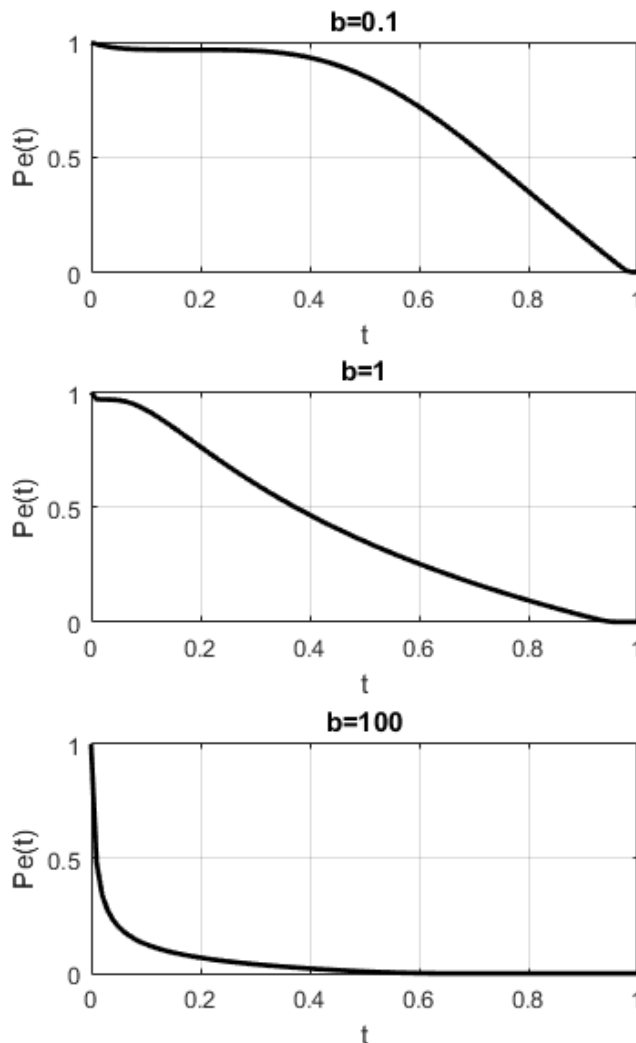


Рис. 2. Изменение давления в окрестности трещины с течением времени

Ітак, при будь-якій швидкості фільтрації тиск газу в околиці 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 околиці тріщини і в її порожнині. На наступному етапі виникає термодинамічна сила, різниця тисків $p(\tau) - p_e(\tau)$ в порожнині тріщини і в її околиці, і тиск в тріщині падає.

Таким чином, отримані закономірності зміни тиску газу в околиці магістральної тріщини при стаціонарному русі вибою. Це дозволить в подальшому, дослідивши 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 швидкість 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 околиці 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.