

УДК 622.831: 622.537.86

Н.А. Калугина, Э.П. Фельдман

РАЗВИТИЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРЕЩИН В ГАЗОНАСЫЩЕННОМ УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ ПОДВИГАНИИ ЗАБОЯ

Институт физики горных процессов НАН Украины

Исследованы возможные варианты развития магистральных трещин в краевой части угольного пласта при разгрузке от горного давления за счет стационарного подвигания забоя.

Ключевые слова: магистральная трещина, газ, угольный пласт, подвигание забоя

Введение

Роль разгрузки и фильтрации газа в процессе развития магистральных трещин в угольном пласте рассматривалась рядом авторов [1, 2]. Было указано, что весьма важную роль в инициации разрушения краевой части пласта играет скорость разгрузки. Внезапная разгрузка была изучена в [3], где были установлены критерии роста газонаполненных трещин, которые обобщают критерий Гриффитса.

В предлагаемой работе исследованы возможные варианты развития магистральных трещин в краевой части пласта, когда разгрузка реализуется за счет стационарного, относительно медленного, постепенного подвигания забоя при отработке пласта.

I. Рассмотрим трещину, плоскость залегания которой параллельна обнаженной поверхности забоя и находится достаточно далеко от этой поверхности. На трещину действуют сжимающие напряжения. Для сквозной трещины, которую рассматриваем с целью упрощения выкладок, но без ограничения общности (двумерная задача), речь идет о двух компонентах напряжений – горном давлении σ и поперечной по отношению к плоскости залегания компоненты σ_{\perp} . Эта последняя сильно зависит от расстояния по продвижению от забоя до рассматриваемого участка пласта (рис. 1). Кроме того, трещина подвергается действию давления P газа, заключенного в ее полости. Напряжения, действующие на берега трещины, – это разность $P - \sigma_{\perp}$. Действие напряжений σ_{\parallel} сводится в основном к «задавливанию» транспортных каналов [1], выходящих на свободную поверхность, с соответствующим уменьшением коэффициента фильтрации газа через эту поверхность.

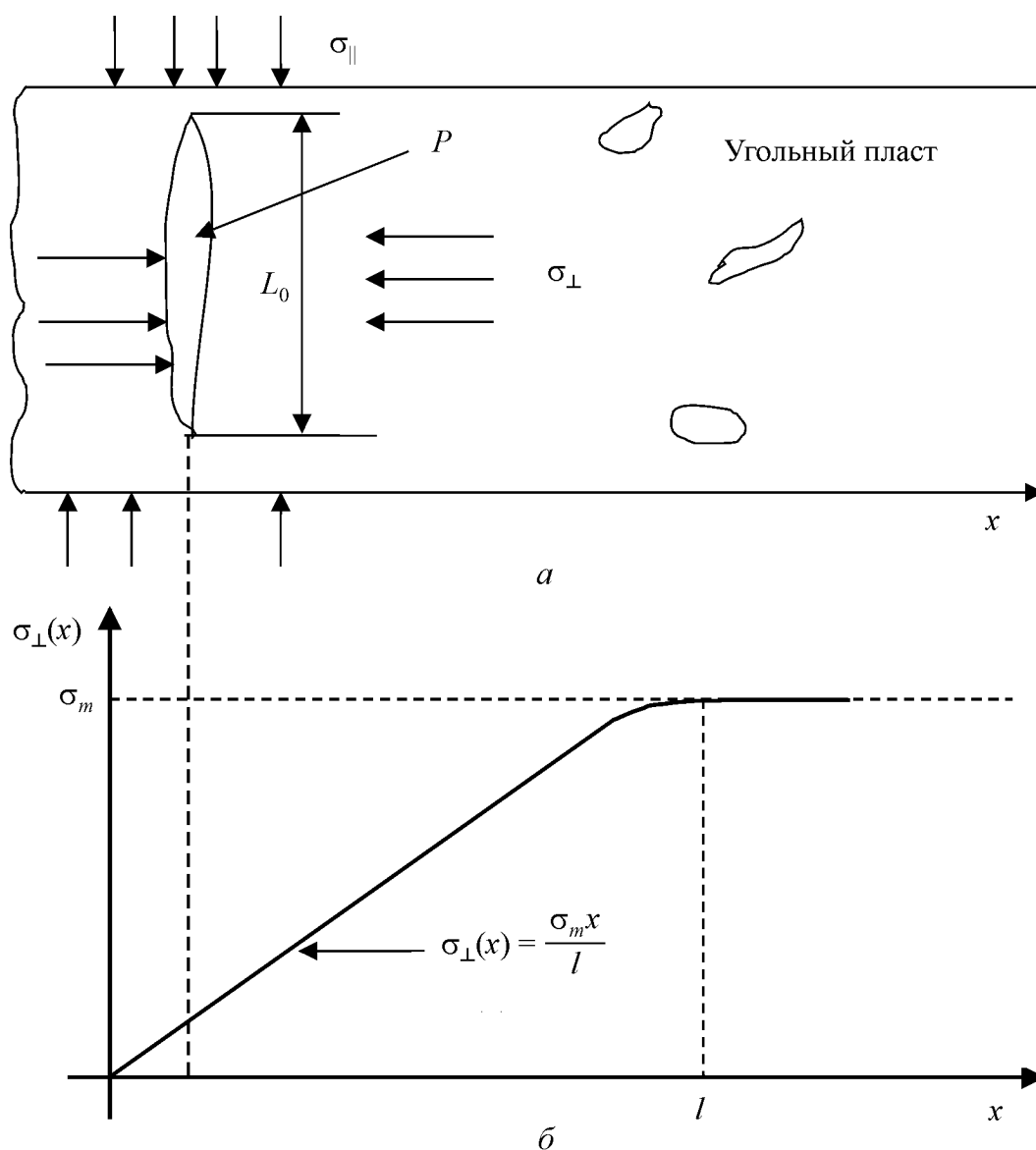


Рис. 1. Схема расположения трещины в газонасыщенном угольном пласте (а) и распределение напряжений бокового распора по простирацию пласта (б)

Зависимость $\sigma_{\perp}(x)$ можно считать линейной на участке от 0 до l , где l соответствует расстоянию от забоя до пика опорного давления. Для x , больших l , $\sigma_{\perp}(x)$ можно считать постоянной, равной ее значению σ_m в нетронутом пласте. Итак,

$$\sigma_{\perp}(x) = \begin{cases} \sigma_m \frac{x}{l}, & \text{если } x < l \\ \sigma_m, & \text{если } x > l \end{cases}. \quad (1)$$

Обозначим объем трещины (в двумерном случае это площадь ее сечения) в нетронутом (неразгруженном) пласте через V_0 . По мере продвижения забоя пласт разгружается. Величина разгрузки от поперечной компоненты напря-

жений определяется разностью $\sigma_m - \sigma_{\perp}(x)$, где x следует трактовать как расстояние от забоя до трещины. В работе [3] показано, что при данной величине разгрузки объем трещины определяется соотношением

$$V_1 = V_0 + \frac{\sigma_m - \sigma_{\perp}}{B} L^2, \quad (2)$$

где B – упругий модуль каркаса, L – длина (размер) трещины.

При подвигании забоя расстояние x постепенно сокращается. При $x > l$ $V = V_0$. Когда x становится меньше l , т.е. при вхождении трещины в зону разгрузки, $\sigma_{\perp}(x)$ постепенно уменьшается, так что объем трещины увеличивается. Считаем, что x изменяется со временем по закону

$$x = l - vt, \quad (3)$$

где v – скорость подвигания забоя. При этом отсчет времени идет от момента вхождения трещины в зону разгрузки. Поэтому согласно (1) и (3)

$$\sigma_m - \sigma_{\perp} = \sigma_m - \sigma_m \left(1 - \frac{vt}{l}\right) = \sigma_m \frac{vt}{l}. \quad (4)$$

Следовательно, в соответствии с (2) при подвигании забоя и увеличении разгрузки происходит рост объема трещины по линейному закону:

$$V_1 = V_0 + \frac{\sigma_m}{B} \frac{Vt}{l} L^2. \quad (5)$$

Конечно, согласно (3) следует ввести ограничение по времени:

$$t < \frac{l}{v}.$$

Согласно (5) в начальный момент разгрузка отсутствует, объем трещины и ее размер равны исходным значениям соответственно V_0 и L_0 . К моменту $t = \frac{l}{v}$ происходит полная разгрузка.

II. Наиболее вероятные сценарии развития трещины при стационарном подвигании лавы состоят в следующем.

1. Пусть давление газа в полости трещины и в окружающем фильтрационном объеме в начальный момент одинаковы и равны P_0 , и пусть выполняется условие отсутствия роста трещины по Гриффитсу, т.е.

$$\frac{\pi}{2} P_0 \sqrt{L_0} \equiv M_0 < M_c, \quad (6)$$

где M_c – модуль сцепления угля.

При продвижении фронта работ к трещине ее объем увеличивается, давление газа в ней падает. Это сопровождается возникновением градиента давления между трещиной и ее окружением, в результате чего в трещину начинает поступать газ из фильтрационного объема. Подобного типа про-

цесс был описан в [3]. Ясно, что в таком процессе давление газа в трещине может лишь уменьшаться ввиду роста объема трещины. Поэтому условие Гриффитса нераспространения трещины в процесс разгрузки

$$\frac{\pi}{2} [P_1 - \sigma_{\perp}(x(t))] \sqrt{L_0} < M_c \quad (7)$$

будет выполняться в любой момент времени ввиду предположения (6). Трещина расти не будет: $L(t) = L_0$.

2. Пусть теперь в начальный момент

$$\frac{\pi}{2} P_0 \sqrt{L_0} > M_c . \quad (8)$$

Выполнение (или невыполнение) неравенства (7) при условии (8) зависит от того, медленнее или быстрее падает давление $P(t)$ в полости трещины, по сравнению с уменьшением сжимающих напряжений $\sigma(x(t))$ по мере продвижения забоя. А это, в свою очередь, зависит от скорости фильтрации газа в полость трещины.

Если давление $P(t)$ сохраняется почти на уровне P_0 , т.е. меняется незначительно, то наступит момент, когда трещина тронется с места и произойдет разрушение. Если же давление газа в полости трещины быстро упадет, то разрушения не будет.

III. Для того чтобы выявить влияние отдельных факторов на исследуемый процесс, выведем и проанализируем уравнение для $P(t)$ для фиксированной длины $L(t) = L_0$. Исходным является «импедансное» соотношение, взятое из [4] и модифицированное в [3]:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{2\gamma L_0 \sqrt{D_f}}{\sqrt{\pi T}} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{P_0 - P(\tau)}{\sqrt{t - \tau}} d\tau, \quad (9)$$

где $N(t)$ – число молекул газа в полости трещины, γ – пористость угля, T – абсолютная температура, D_f – коэффициент фильтрации газа. Вообще говоря, в уравнении (9) под P_0 следует понимать давление газа в окружающей трещину фильтрационном объеме. Однако для упрощения анализа будем предполагать, что $P_0 = \text{const}$.

Ввиду того, что в любой момент $P(t)V(t) = N(t)T$, из (9) следует, что

$$P(t)V(t) = P_0 V_0 + \frac{2\gamma L_0 \sqrt{D_f}}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{P_0 - P(\tau)}{\sqrt{t - \tau}} d\tau. \quad (10)$$

Поскольку объем трещины подчиняется соотношению (5), при $L(t) = L_0$ получим уравнение

$$P(t)V_0 \left(1 + \frac{vt}{l} \frac{\sigma_m L_0^2}{BV_0} \right) = P_0 V_0 + \frac{2\gamma L_0 \sqrt{D_f}}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{P_0 - P(\tau)}{\sqrt{t - \tau}} d\tau. \quad (11)$$

Введем относительное изменение давления $y(t) \equiv \frac{P_0 - P(t)}{P_0}$, параметр $a \equiv \frac{\sigma_m L_0}{B Z_0}$ и зияние трещины $Z_0 \equiv \frac{V_0}{L_0}$. Тогда из (11) получим

$$-\left(1 + \frac{v \sigma_m L_0}{l B Z_0} t\right) y(t) + \frac{v \sigma_m L_0}{l B Z_0} t = \frac{2\gamma \sqrt{D_f}}{\sqrt{\pi Z_0}} \int_0^t \frac{y(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau. \quad (12)$$

Обезразмерим время на величину

$$t_f \equiv \frac{\pi Z_0^2}{4\gamma^2 D_f}, \quad (13)$$

которую можно считать временем заполнения трещины газом из фильтрационного объема.

При таком обезразмеривании и связанным с этим изменением масштаба времени уравнение (12) приобретает вид

$$-(1 + qt)y(t) + qt = \int_0^t \frac{y(\tau) d\tau}{\sqrt{t-\tau}}, \quad (14)$$

т.е. решение зависит лишь от одного безразмерного параметра

$$q \equiv a \frac{V}{l} \frac{\pi Z_0^2}{4\gamma^2 D_f} = a \frac{t_f}{t_m}, \quad t_m \equiv \frac{l}{v}, \quad (15)$$

содержащего отношение времени заполнения трещины ко времени продвижения забоя на расстояние порядка размера зоны разгрузки $t_m = \frac{l}{v}$. Если для оценки взять $l \sim 2$ м, $v \sim 2$ м/сут, то $t_m \sim 10^3$ мин. Для оценки времени заполнения трещины возьмем $Z_0 \sim 10^{-3}$ м, $\gamma \sim 10^{-2}$, $D_f \sim 10^{-6}$ м²/с. Тогда получим $t_f \sim 10$ мин. Если для оценки параметра a взять $\sigma_m \sim 10$ МПа, $L_0 \sim 10^{-1}$ м, $B \sim 10^3$ МПа, то получим $a \sim 1$. Таким образом, параметр $q \sim 10^{-2}$.

Асимптотика решения (14) будет:

– на временах $t \ll 1$

$$y(t) \approx qt, \quad (16,a)$$

– на больших временах

$$y(t) \approx 1 - \frac{2}{q\sqrt{t}}. \quad (16,b)$$

Таким образом давление стремится к нулю лишь на очень больших временах $\sim \frac{1}{q^2}$ по закону обратного корня, разумеется, если $q \ll 1$.

Результаты численного решения уравнения (13) для $q = 10^{-2}$ на малых и промежуточных временах приведено в графическом виде на рис. 2.

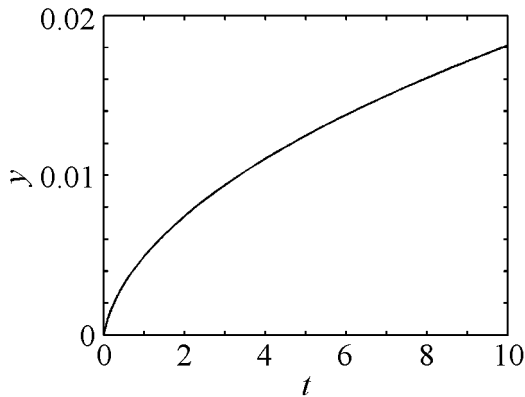


Рис. 2. Численное решение уравнения (14) при $q = 0,01$

Напомним, что в (16,а)–(16,б) t – это безразмерное время.

Из (16) видно, что $y(t) \ll 1$, т.е. давление $P(t)$ в большинстве случаев близко к P_0 на протяжении большого (порядка суток) времени t_m/a , т.е. при движении забоя давление в трещине практически не меняется, поскольку заполнение трещины фильтрующимся газом происходит быстро – за время $t_f \ll t_m/a$. В связи с этим при $P_0 = \text{const}$ при приближении забоя к трещине и уменьшении σ_{\perp} (разгрузка) возникает возможность роста трещин, а значит, опасность выброса.

В действительности, как уже указывалось, под P_0 следует подразумевать давление газа в окружающем трещину материале. А это давление меняется за счет выхода газа из угля в выработку. Время последнего процесса $t_c \approx \frac{l^2}{D_f}$ и для $D_f \sim 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ и $l \sim 4 \text{ м}$ t_c порядка суток, т.е. вполне может

быть гораздо меньше времени подхода забоя к трещине $t_m = \frac{l}{v}$. В таком случае пласт быстро дегазируется и опасность выброса исчезает. Соответствующее критериальное неравенство имеет вид:

$$\frac{lv}{D_f} \ll 1, \quad (17)$$

т.е. скорость подвигания забоя должна быть достаточно малой, а коэффициент фильтрации через поверхность забоя – большим.

Вместе с тем может случиться и так, что при большой скорости подвигания забоя и очень малом коэффициенте фильтрации забой может продвигаться и «поглотить» трещину за времена, меньшие времени наполнения трещины газом. Соответствующий критерий является следствием неравенства $q \geq 1$ и имеет вид

$$V \frac{\pi Z_0^2}{4\gamma^2 D_f} \geq \frac{l}{a}. \quad (18)$$

И в таком случае исчезает опасность выброса. Для этого зияние трещины должно быть достаточно большим, коэффициент фильтрации малым, ско-

рость подвигания забоя v большой, пористость малой, т.е. речь может идти о плотном угле или породе.

Вышеприведенные соображения и оценки показывают, что могут возникать ситуации, когда безопасная выемка угля происходит либо при очень малых, либо очень больших скоростях подвигания забоя. Соответствующие критерии имеют вид (17) и (18) соответственно. Однако в (17) под D_f следует понимать коэффициент фильтрации в защитной зоне пласта, а в (18) – в зоне формирования трещин. В целом же выбросоопасность пласта при стационарном подвигании забоя намного меньше, чем при внезапной разгрузке, т.е. взрыве, обвале и т.п.

1. *Петухов И.М.* Механика горных ударов и выбросов / И.М. Петухов, А.М. Линьков. – М.: Недра, 1983. – 280 с.
2. *Шевелев Г.А.* Динамика выбросов угля, породы и газа / Г.А. Шевелев. – К.: Наукова думка, 1989. – 160 с.
3. *Фельдман Э.П.* Ударный и фильтрационный этапы развития магистральных трещин вблизи обнаженной поверхности газонасыщенного угольного пласта / Э.П. Фельдман, Т.А. Василенко, Н.А. Калугина // Физико-технические проблемы горного производства. – Донецк: ИФГП НАН Украины, 2013. – Вып.16. – С. 58–70.
4. *Араманович И.Г.* Уравнения математической физики (2-е изд.) / И.Г. Араманович., В.И. Левин – М.: Наука, 1969. – 288 с.

Н.О. Калугина, Е.П. Фельдман

РОЗВИТОК МАГІСТРАЛЬНИХ ТРІЩИН В ГАЗОНАСИЧЕНОМУ ВУГІЛЬНОМУ ПЛАСТІ ПРИ СТАЦІОНАРНОМУ ПРОСУВАННІ ЗАБОЮ

Досліджено можливі варіанти розвитку магистральних тріщин в крайовій частині вугільного пласта при розвантаженні за рахунок стаціонарного просування вибою.

Ключові слова: магистральна тріщина, газ, вугільний пласт, просування вибою

N.A. Kalugina, E.P. Feldman

DEVELOPMENT OF MAIN CRACKS IN A GAS-SATURATED COAL BED AT THE STATIONARY PUSHING OF COALFACE

The possible variants of growth of main cracks in edgenal part of coal bed at unloading from rock pressure due to the stationary advancement of backwall are researched.

Keywords: main crack, gas, coal bed, advancement of coal backwall