РОЛЬ РАЗГРУЗКИ И ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА В ПРОЦЕССАХ РАЗВИТИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРЕЩИН В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ

Э.П. Фельдман, Н.А. Калугина, Институт физики горных процессов НАН Украины, Украина

Исследовано явление развития магистральных трещин в краевой части угольного пласта при быстрой разгрузке от горного давления.

Проблема внезапных выбросов угля, породы и газа при отработке газонасыщенных угольных пластов занимает особое место в ряду проблем геомеханики и горного производства. Ее актуальность в контексте обеспечения безопасной работы горняков не нуждается в разъяснении. Обработка и анализ статистических данных по выбросам [1,2] позволила выявить приоритетность влияния отдельных факторов на подготовку и развязывание выброса. Основными из этих факторов являются горное и газовое давление [3,4]. Под их воздействием трещины, находящиеся в пласте, могут развиваться в том смысле, что их размер (длина), зияние (раскрытие) могут при определенном стечении обстоятельств вырасти настолько, что произойдет быстрое разрушение краевого участка пласта. Эти представления выдвигались, развивались и уточнялись многими исследователями [5,6,7], среди которых выделяются представления школы Христиановича о послойном разрушении призабойной части пласта.

Наша работа представляет попытку предложить модель и методами теоретической физики проанализировать явления развития магистральных трещин, спровоцированного быстрой разгрузкой пласта и дать оценочные критерии реализации и времени разрушения краевого участка пласта.

В нетронутом газонасыщенном пласте трещины находятся под воздействием напряжений, обусловленных горным давлением, и пластовым давлением газа P_0, находящегося в полости трещин. Несмотря на разрывающее действие внутриполостного газового давления, трещины не развиваются, поскольку они «задавлены» сжимающими напряжениями. При отработке пласта (для определенности рассматриваем пласт горизонтального залегания) напряжения, действующие на угольный массив, перераспределяются. Горное давление σ_{II} (см. рис.1) становится неоднородным (опорное давление). Напряжения, поперечные по отношению к обнаженной поверхности, почти исчезают. Происходит разгрузка пласта от этой компоненты напряжений. На самой обнаженной поверхности можно считать эти напряжения равными нулю. По мере удаления от этой поверхности напряжения $\sigma_{\perp}$ нарастают, приближаясь к своему максимуму σ_m на расстояниях порядка несколько толщин пласта h. Поэтому величина разгрузки характеризуется разностью $\sigma_m - \sigma_{\perp}$.

После такой разгрузки может начаться процесс разрушения материала за счет развития трещин, плоскость залегания которых параллельна обнаженной поверхности (см. рис. 1). Трещины иной ориентации по прежнему «задавлены» сжимающим горным давлением.

Рассмотрим одну из трещин выделенной ориентации. Для анализа используем двумерную модель, которая упрощает расчеты без потери общности результатов.

Строго говоря, следовало бы рассмотреть совокупность, систему трещин. Вместо этого рассматривается одна магистральная трещина, а остальные трещины и поры видоизменяют поля напряжений в окрестности магистральной трещины и являются резервуаром газа, который фильтруется в полость этой трещины. В этом состоит известная аппроксимация среднего поля (mean-field approximation).

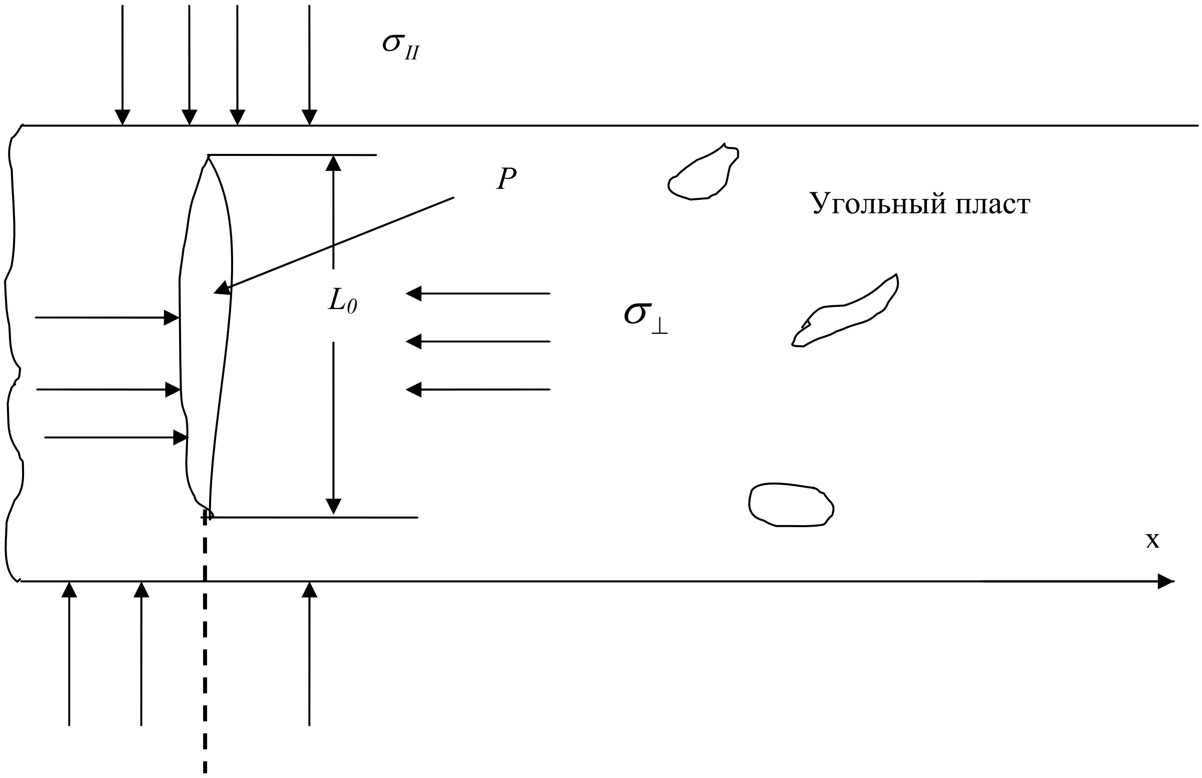

Рис.1 Схема расположения магистральной трещины в газонасыщенном угольном пласте.

Объем трещины определяется объемом исходной полости и действующими напряжениями на ее берегах. Решение классической задачи теории упругости дает для объема трещины (в двумерном случае для площади сечения) следующее выражение:

$$V = V_c + \frac{\sigma}{B} L^2 \ , \tag{1}$$

где V_c – объем исходной полости, B- упругий модуль материала, L - длина трещины, σ - напряжения на ее берегах. В нетронутом пласте σ состоит из двух слагаемых – сжимающих напряжений σ_m и пластового давления газа. Поэтому объем трещины в нетронутом пласте равен

$$V_0 = V_c - \frac{\sigma_m - P_0}{B} L_0^2, \tag{2}$$

где L_0 – начальная длина трещины.

В отрабатываемом, т.е. разгруженном, пласте $\sigma = -\sigma_\perp + P_1$, поскольку давление газа в полости трещины уменьшается от P_0 до P_1 вследствие увеличения объема трещины до величины

$$V_1 = V_c - \frac{\sigma_\perp - P_1}{B} L_0^2 . \tag{3}$$

Из (3) и (2) следует, что объем трещины после разгрузки

$$V_1 = V_c + \frac{\sigma_m - \sigma_\perp - P_0 + P_1}{B} L_0^2 \ . \tag{4}$$

Формула (4) верна лишь в случае, когда длина трещины не меняется в процессе разгрузки пласта.

На практике почти всегда [5] давление газа в несколько раз меньше горного давления; поэтому изменением давления P_0 - P_1 можно пренебречь по сравнению с величиной разгрузки $\sigma_m - \sigma_\perp$. Как следствие, изменение объема трещины при разгрузке не зависит от давления газа, находящегося в трещине –

$$V_1 = V_0 + \frac{\sigma_m - \sigma_\perp}{B} L_0^2 = V_0 \left[1 + \frac{\sigma_m - \sigma_\perp}{B} \frac{L_0^2}{V_0} \right] \tag{5}$$

Определим зияние трещины z_0 как

$$z_0 \equiv \frac{V_0}{L_0} \tag{6}$$

и введем безразмерный параметр

$$a \equiv \frac{\sigma_m - \sigma_\perp}{B} \frac{L_0}{z_0}. \tag{7}$$

Тогда

$$V_1 = V_0 (1 + a) = V_0 \left[1 + \frac{\sigma_m - \sigma_\perp}{B} \frac{L_0}{z_0} \right] \tag{8}$$

Параметр a является произведением малого параметра $\frac{\sigma_m - \sigma_\perp}{B}$, т.е. относительной разгрузки, на большой параметр $\frac{L_0}{z_0}$, т.е. отношение длины (поперечника) трещины к ее зиянию. Например, положив $\sigma_m = 2 \cdot 10^7\,Па$, $B = 10^9\,Па$, $L_0 = 10\,см$, $z_0 = 1\,мм$ получим, что $a=2$. Очевидно, что величина параметра a может изменяться в широких пределах, от a <<1 до a >>1.

До сих пор речь шла о разгрузке пласта безотносительно темпа, скорости разгрузки. В дальнейшем предположим, что разгрузка происходит мгновенно, например, вследствие взрыва. За столь малое время количество газа в полости исходной трещины не меняется и, следовательно, согласно уравнению состояния идеального газа, при неизменной температуре

$$P_1 V_1 = P_0 V_0 . \tag{9}$$

Подставив сюда (8), получим давление газа в трещине после разгрузки:

$$P_1 = \frac{P_0}{1 + a}, \tag{10}$$

т.е. давление сразу после разгрузки падает.

Перейдем непосредственно к вопросу о развитии трещины. Как известно [8,9], Гриффитсом было установлено, что размер трещины (в нашем случае это L) возрастает в случае, когда коэффициент концентрации напряжений в вершине трещины становиться большим ее модуля сцепления M_c, обусловленного силами взаимодействия берегов трещины в ее устье. В двумерной модели коэффициент концентрации равен $\frac{\pi}{2} \sigma \sqrt{L}$, где σ – напряжения на берегах трещины. В рассматриваемой ситуации сразу после разгрузки $\sigma = P_1 - \sigma_\perp$, поэтому, согласно Гриффитсу, трещина не будет распространяться, если

$$\frac{\pi}{2} (P_1 - \sigma_\perp) \sqrt{L_0} < M_c . \tag{11}$$

Если в нетронутом пласте

$$M_0 \equiv \frac{\pi}{2} P_0 \sqrt{L_0} < M_c \tag{12}$$

и, поскольку, согласно (10) $P_1 < P_0$, то с большим запасом будет выполняться неравенство (11), т.е. трещина не будет распространяться в длину и все сведется к разбуханию трещины, к увеличению ее зияния. Таким образом, неравенство (12) представляет собой достаточное условие невыбросоопасности.

Для представительных значений входящих в (12) параметров $P_o = 10 атм = 10^6 Па$, $B = 4 \cdot 10^9 Па$, $L_0 = 10^{-2} м$, $\chi = 10 Па \cdot м$, $M_c \approx \sqrt{B\chi}$, χ - удельная эффективная поверхностная энергия угля, получаем, что неравенство (12) выполняется. Однако при небольшом повышении пластового давления или длины магистральной трещины неравенство(12) перестает выполняться, т.е. вместо (12) выполняется обратное неравенство

$$M_0 \equiv \frac{\pi}{2} P_0 \sqrt{L_0} > M_c . \qquad (12а)$$

Это, однако, не означает, что обязательно начнется разрушение. События могут пойти двумя возможными сценариями.

1) Если $\frac{\pi}{2}(P_1 - \sigma_{\perp})\sqrt{L_0} < M_c$, то трещина сразу после разгрузки не будет распространяться, она лишь разбухает. В дальнейшем, при натекании в нее газа из-за возникшего градиента давления $P_0 - P_1$, может случиться, что давление газа в ней достигнет критического рубежа, гриффитсовское неравенство (11) превратится в равенство и начнется рост трещины в длину.

2) Если $\frac{\pi}{2}(P_1 - \sigma_{\perp})\sqrt{L_0} > M_c$, то произойдет скачок поперечника трещины до L_2 и, соответственно, уменьшение давления до P_2 таких, что будет выполняться гриффитсовское равенство

$$\frac{\pi}{2}(P_2 - \sigma_{\perp})\sqrt{L_2} = M_c \qquad (13)$$

и трещина «выстрелит» от размера L_0 до размера L_2.

Чтобы найти L_2, необходимо напомнить, что первичное разбухание и последующее «выстреливание» трещины происходит практически мгновенно, за времена порядка 10^{-5} *сек*, поэтому количество газа в трещине остается неизменным, следовательно,

$$P_2 V_2 = P_0 V_0 . \qquad (14)$$

Объем трещины после разбухания и «выстреливания» равен, по аналогии с (5)

$$V_2 = V_0 \left[1 + a \frac{L_2^2}{L_0^2} \right] \qquad (15)$$

Итак, имеем три уравнения (13), (14) и (15) с тремя неизвестными, P_2, V_2 и L_2. Из этой системы получим уравнение для L_2. Для определенности рассматриваем максимальную разгрузку, когда $\sigma_{\perp}=0$, а разгрузка $\sigma_m - \sigma_{\perp} = \sigma_m$.

Введем обозначение $\lambda \equiv \sqrt{\frac{L_2}{L_0}}$. Тогда, методом исключения неизвестных, придем к следующему уравнению:

$$\frac{\lambda}{1 + a\lambda^4} = \frac{M_c}{M_0}. \qquad (16)$$

Графическое решение этого уравнения представлено на рис.2

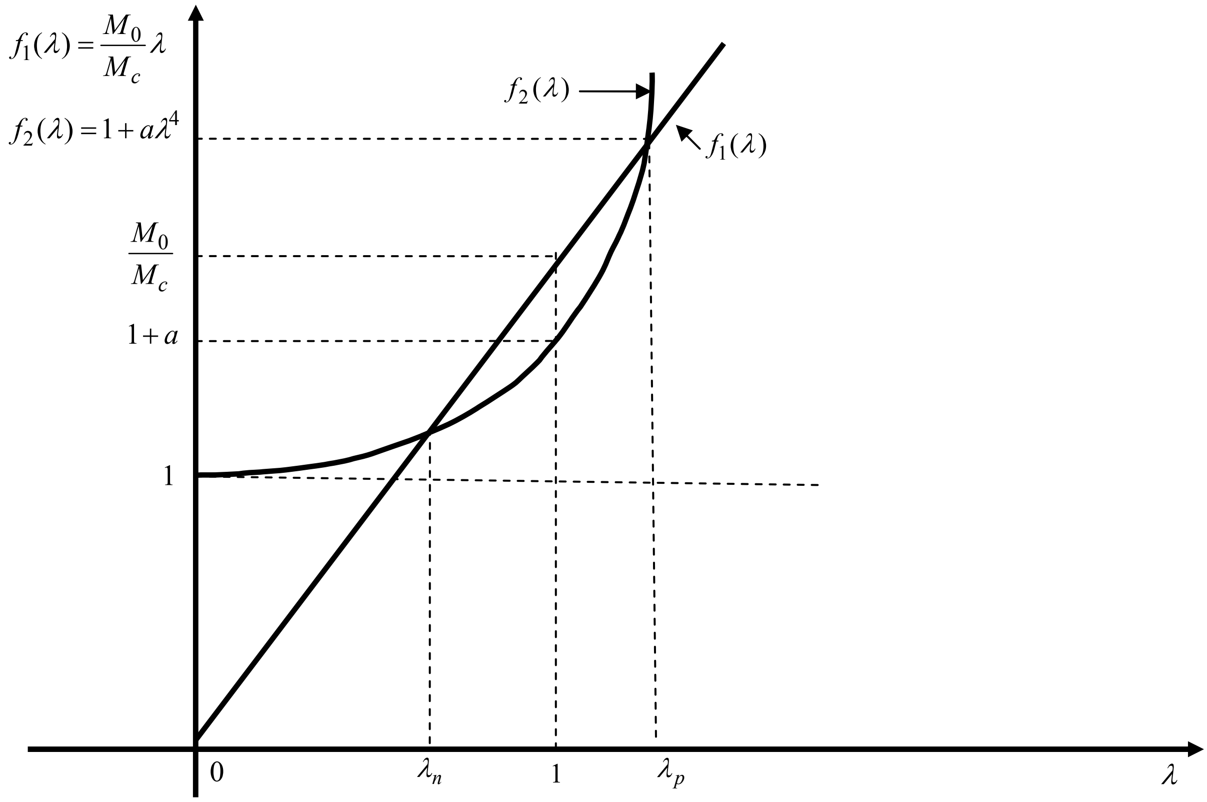

Рис.2. Графическое решение уравнения (16).

Из рис.2 следует, что уравнение (16) имеет либо два вещественных корня, либо не имеет ни одного. Первый из этих случаев реализуется при выполнении неравенства

$$a < \frac{M_0}{M_c} - 1, \quad \frac{\sigma_m - \sigma_\perp}{B}\frac{L_0}{z_0} < \frac{M_0}{M_c} - 1\,. \qquad (17)$$

Из двух корней следует выбрать тот, для которого $\lambda > 1$, т.е. λ_p (рис.2), поскольку трещина никогда не схлопывается, ее размер может только увеличиться. Трещина «выстреливает», т.е. увеличивает скачком свой размер от L_0 до $\lambda_p^2 L_0$. В этом смысле можно говорить об «ударном» этапе развития трещины.

Если разгрузка максимальна, равна σ_m, то тот же критерий (17) легко получается из неравенства $\frac{\pi}{2} P_1 \sqrt{L_0} > M_c$ с учетом соотношения (10). Для выполнения критерия (17) стреляния трещины необходимо, но недостаточно, выполнения критерия Гриффитса $M_0 > M_c$ в нетронутом пласте. Для разгруженного пласта, сверх того, требуется, чтобы параметр a был достаточно мал. А это происходит при большом исходном зиянии трещины и невысоком уровне максимальной разгрузки, т.е. не очень большом горном давлении. С увеличением глубины разработки пластовое давление газа обычно нарастает, что способствует развитию трещин. Но, в то же время, разгрузка нарастает, трещина разбухает и давление газа в ней падает, что снижает возможность роста трещин. По - видимому, существует наиболее опасная по росту трещин, а значит и по выбросам, глубина разработки газонасыщенных угольных пластов.

Подводя промежуточный итог, можно утверждать, что критериальное неравенство (17), при выполнении которого происходит скачкообразный рост трещины, является обобщением критерия Гриффитса на случай, когда разрывающие напряжения создаются газом полости трещины.

Что касается относительной величины скачка размера трещины, то он (скачок) растет с ростом $\frac{M_0}{M_c}$, т.е. с увеличением пластового давления, уменьшением модуля сцепления, ростом зияния и уменьшением разгрузки.

Если в пласте (или породе) имеется система трещин, параллельных друг другу и расположенных на сравнительно малом расстоянии друг от друга, то при «выстреливании» ближайшей к поверхности трещины наступает мгновенная разгрузка материала в окрестности соседней трещины, и тогда «выстреливает» эта трещина. Далее указанный процесс будет происходить по принципу домино, чем реализуется внезапный выброс угля, породы и газа путем послойного отрыва по Христиановичу [7]. Затухание выброса происходит, например, потому, что нарушается структура системы параллельных трещин.

Оценка расстояния между трещинами, при котором может произойти послойный отрыв, производится на основании неравенства (11). В качестве $\sigma_\perp$ следует взять величину сжимающих напряжений в трещине, находящейся на расстоянии x от поверхности, x – искомое расстояние между трещинами.

Вполне корректно считать, что

$$\sigma_\perp(x) = \sigma_m \frac{x}{h}, \tag{18}$$

где h, по порядку, толщина пласта. Если к тому же предположить, что $P_1 \approx P_0$, то приходим к оценочному неравенству

$$\frac{\sigma_m}{P_0}\frac{x}{h} < 1 - \frac{M_c}{M_0} \tag{19}$$

Как можно увидеть из приведенных ранее оценок, для $L_0 \approx 20$ *см*, $\frac{\sigma_m}{P_0} \approx 4$ и $\frac{M_c}{M_0} \approx 0{,}4$, для x получаем оценку:

$$x < 0.1h, \tag{20}$$

т.е. для толщины пласта в *1м* расстояние между трещинами, при котором может произойти послойный отрыв, должно быть менее *10 см*.

Неравенство (19) можно рассматривать как один из критериев развязывания выброса.

Список литературы

1. Ходот В.В. Внезапные выбросы угля и газа/В.В. Ходот. М.: Госгортехиздат, 1961. — 364с.

2. Айруни А.Т. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах / А.Т. Айруни. М.: Наука, 1987. —310 с.

3. Алєксєєв А.Д. Нерівноважна термодинаміка і викидонебезпечність вугільного пласта./А.Д.Алєксєєв, Е.П. Фельдман //Ukr. J. Phys. 2012, Vol. 57, № 6, p.619—622.

4. Петухов И. М. Механика горных ударов и выбросов/ Петухов И. М., Линьков А. М.: Недра, 1983. — 280 с.

5. Алексеев А.Д. Физика угля и горных процессов / А.Д. Алексеев. Киев: Наук. думка, 2010. — 423с.

6. Шевелев Г.А. Динамика выбросов угля, породы и газа / Г.А. Шевелев. ─ К.: Наукова думка, 1989 . ─ 160с.

7. Христианович С.А. Выбросоопасные ситуации. Дробление. Волна выброса//С.А.Христианович, Р.Л. Салганик. Препринт №152 (ИПМ АН СССР). Москва, 1980 г.

8. Griffitth A.A. The phenomenon of rupture and flow in solids. Phil. Trans. Roy.Soc., 1920, A221, 163-198.

9. Баренблатт Г.И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении/ Г.И. Баренблатт. //ПМТФ.- №4, 1961, с.3-56.