

УДК 622.831: 622.537.86

## РОЛЬ РАЗГРУЗКИ И ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА В ПРОЦЕССЕ РАЗВИТИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРЕЩИН В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ

Э. П. Фельдман, Н. А. Калугина, Т. Н. Мельник\*

Институт физики горных процессов Национальной академии наук Украины,  
49600 Днепропетровск, Украина

\* Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина, 83114 Донецк, Украина  
E-mails: feldman\_40@mail.ru, kalugina\_n\_a@inbox.ru, melnik@fti.dn.ua

С использованием методов теоретической физики проанализирован процесс развития магистральных трещин в угольном пласте вследствие быстрой разгрузки. Получены критерий разрушения и критерий времени разрушения участка на краю пласта.

Ключевые слова: угольный пласт, газонаполненная трещина, фильтрация, диффузия, выброс.

DOI: 10.15372/PMTF20170117

Исследование причин внезапных выбросов угля, породы и газа при отработке газонасыщенных угольных пластов занимает особое место в ряду проблем геомеханики и горного производства. Анализ статистических данных о выбросах [1, 2] позволил выявить основные факторы, влияющие на подготовку и начало выброса, в частности горное и газовое давление [3, 4]. Под действием этих факторов в пласте могут развиваться трещины. При определенных условиях их размер (длина) и раскрытие могут увеличиться настолько, что произойдет быстрое разрушение участка на краю пласта [5–9].

В данной работе предложена модель развития магистральных трещин вследствие быстрой разгрузки пласта и получены критерий разрушения и критерий времени разрушения участка на краю пласта.

В нетронутом газонасыщенном пласте трещины находятся под действием напряжений, обусловленных влиянием горного давления и пластового давления газа  $P_0$ , находящегося в полости трещин. Несмотря на разрывающее действие внутриполостного давления газа, трещины не развиваются, поскольку они “сдавлены” сжимающими напряжениями. При отработке пласта (рассматривается горизонтально залегающий пласт) напряжения, действующие на угольный массив, перераспределяются. Горное давление  $\sigma_{II}$  (рис. 1) становится неоднородным (опорное давление). Напряжения, являющиеся поперечными относительно обнаженной поверхности, практически исчезают, в результате чего происходит разгрузка пласта. На самой обнаженной поверхности эти напряжения можно считать равными нулю. По мере удаления от поверхности напряжения  $\sigma_I = \sigma_{\max}x/l$  увеличиваются, приближаясь к максимальному значению  $\sigma_{\max}$  на расстояниях порядка нескольких толщин пласта  $h$  (рис. 2). Поэтому величина разгрузки характеризуется разностью  $\sigma_{\max} - \sigma_I$ .

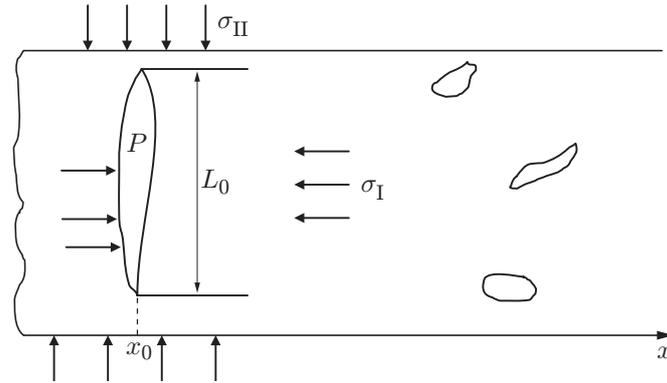


Рис. 1. Схема расположения трещины в газонасыщенном угольном пласте

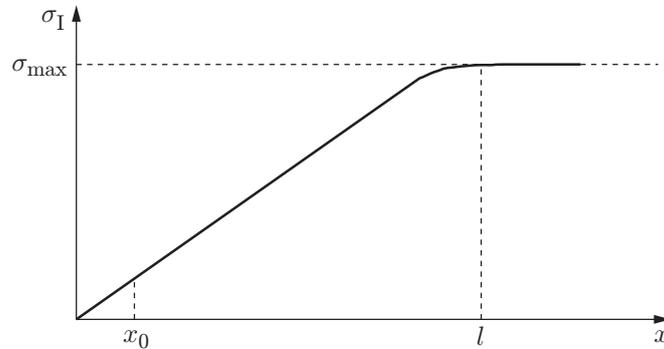


Рис. 2. Распределение напряжений бокового распора в продольном направлении

После разгрузки может начаться процесс разрушения материала вследствие развития трещин, плоскость залегания которых параллельна обнаженной поверхности (см. рис. 1). Трещины иной ориентации по-прежнему “сдавлены” сжимающим горным давлением.

Рассмотрим одну из трещин, параллельных обнаженной поверхности. Для анализа используем двумерную модель.

Объем трещины определяется объемом исходной полости и напряжениями, действующими на ее берегах. Из решения классической задачи теории упругости для объема трещины (в двумерном случае — для площади сечения) следует выражение

$$V = V_{cav} + \frac{\sigma}{B} L^2,$$

где  $V_{cav}$  — исходный объем полости;  $B$  — модуль упругости материала;  $L$  — длина трещины;  $\sigma$  — напряжения на ее берегах. В нетронутом пласте величина  $\sigma$  представляет собой сумму сжимающих напряжений  $\sigma_{max}$  и пластового давления газа. Поэтому объем трещины в нетронутом пласте равен

$$V_0 = V_{cav} - \frac{\sigma_{max} - P_0}{B} L_0^2, \quad (1)$$

где  $L_0$  — начальная длина трещины.

В обрабатываемом, т. е. разгруженном, пласте  $\sigma = -\sigma_I + P_1$ , поскольку давление газа в полости трещины уменьшается от  $P_0$  до  $P_1$ . Вследствие этого объем трещины увеличивается до величины

$$V_1 = V_{cav} - \frac{\sigma_I - P_1}{B} L_0^2. \quad (2)$$

Из (1), (2) следует, что объем трещины после разгрузки равен

$$V_1 = V_0 + \frac{\sigma_{\max} - \sigma_1 - P_0 + P_1}{B} L_0^2. \quad (3)$$

Формула (3) верна лишь в том случае, когда длина трещины не меняется в процессе разгрузки пласта.

На практике, как правило, давление газа в несколько раз меньше горного давления [5], поэтому изменение давления  $P_0 - P_1$  является пренебрежимо малым по сравнению с величиной разгрузки  $\sigma_{\max} - \sigma_1$ . Вследствие этого изменение объема трещины при разгрузке не зависит от давления газа, находящегося в трещине:

$$V_1 = V_0 + \frac{\sigma_{\max} - \sigma_1}{B} L_0^2 = V_0 \left( 1 + \frac{\sigma_{\max} - \sigma_1}{B} \frac{L_0^2}{V_0} \right). \quad (4)$$

Определим раскрытие трещины  $z_0$  по формуле

$$z_0 \equiv V_0 / L_0$$

и введем безразмерный параметр

$$a \equiv \frac{\sigma_{\max} - \sigma_1}{B} \frac{L_0}{z_0}.$$

Тогда

$$V_1 = V_0(1 + a) = V_0 \left( 1 + \frac{\sigma_{\max} - \sigma_1}{B} \frac{L_0}{z_0} \right). \quad (5)$$

Параметр  $a$  является произведением малого параметра (относительной разгрузки)  $(\sigma_{\max} - \sigma_1)/B$  и большого параметра (отношения длины (поперечника) трещины к ее раскрытию)  $L_0/z_0$ . Например, полагая  $\sigma_{\max} = 2 \cdot 10^7$  Па,  $B = 10^9$  Па,  $L_0 = 10$  см,  $z_0 = 1$  мм, получаем  $a = 2$ . Очевидно, что значение параметра  $a$  может изменяться в широком диапазоне от  $a \ll 1$  до  $a \gg 1$ .

Выше рассматривалась разгрузка пласта без учета ее скорости. Предположим, что разгрузка происходит мгновенно, например вследствие взрыва. За столь малый промежуток времени количество газа в полости исходной трещины не меняется, следовательно, согласно уравнению состояния идеального газа при неизменной температуре имеет место равенство

$$P_1 V_1 = P_0 V_0.$$

Подставляя в это равенство (5), получаем выражение для давления газа в трещине после разгрузки

$$P_1 = \frac{P_0}{1 + a}. \quad (6)$$

Таким образом, непосредственно после разгрузки давление падает.

В соответствии с критерием Гриффитса [10, 11] размер трещины (в данном случае  $L$ ) увеличивается, если коэффициент концентрации напряжений в вершине трещины больше модуля сцепления  $M_c$ , обусловленного силами взаимодействия берегов трещины в ее вершине. В двумерной модели коэффициент концентрации равен  $(\pi/2)\sigma\sqrt{L}$ . В рассматриваемом случае непосредственно после разгрузки  $\sigma = P_1 - \sigma_1$ , поэтому согласно критерию Гриффитса трещина не будет распространяться, если

$$\frac{\pi}{2} (P_1 - \sigma_1) \sqrt{L_0} < M_c. \quad (7)$$

Если в нетронутом пласте

$$M_0 \equiv \frac{\pi}{2} P_0 \sqrt{L_0} < M_c \quad (8)$$

и согласно (10)  $P_1 < P_0$ , то выполняется неравенство (7), т. е. длина трещины не увеличивается и после внезапной разгрузки произойдет лишь увеличение ее раскрытия. Таким образом, неравенство (8) представляет собой достаточное условие отсутствия выброса.

При реальных значениях входящих в (8) параметров  $P_0 = 10^6$  Па,  $B = 4 \cdot 10^9$  Па,  $L_0 = 10^{-2}$  м,  $\chi = 10$  Па·м ( $\chi$  — удельная эффективная поверхностная энергия угля) величина  $M_c \approx \sqrt{B\chi}$  имеет значение, для которого неравенство (8) выполняется. Однако при незначительном увеличении пластового давления или длины магистральной трещины вместо неравенства (8) выполняется неравенство

$$M_0 \equiv \frac{\pi}{2} P_0 \sqrt{L_0} > M_c.$$

Однако это не означает, что обязательно начнется разрушение. Возможны следующие варианты развития трещины.

1. Если  $(\pi/2)(P_1 - \sigma_1)\sqrt{L_0} < M_c$ , то непосредственно после разгрузки трещина не будет распространяться, произойдет лишь увеличение ее раскрытия. Затем при затекании в трещину газа вследствие перепада давления  $P_0 - P_1$  давление газа в ней может достигнуть критического значения, при этом неравенство Гриффитса (7) превратится в равенство и длина трещины начнет увеличиваться.

2. Если  $(\pi/2)(P_1 - \sigma_1)\sqrt{L_0} > M_c$ , то поперечный размер трещины увеличится до значения  $L_2$  и соответственно давление уменьшится до значения  $P_2$ , при котором будет выполняться равенство Гриффитса

$$\frac{\pi}{2} (P_2 - \sigma_1)\sqrt{L_2} = M_c \quad (9)$$

и произойдет внезапное увеличение размера трещины  $L_0$  до размера  $L_2$ .

Чтобы найти  $L_2$ , необходимо учитывать, что при внезапной разгрузке увеличение раскрытия трещины и резкое увеличение ее длины происходят практически мгновенно, за время порядка  $10^{-5}$  с, поэтому количество газа в трещине остается неизменным, следовательно,

$$P_2 V_2 = P_0 V_0. \quad (10)$$

Объем трещины после раскрытия и внезапного увеличения ее длины равен

$$V_2 = V_0 \left( 1 + a \frac{L_2^2}{L_0^2} \right). \quad (11)$$

Таким образом, имеем три уравнения (9)–(11) с тремя неизвестными  $P_2$ ,  $V_2$  и  $L_2$ . Из этой системы получаем уравнение для  $L_2$ .

Рассмотрим случай, когда  $\sigma_1 = 0$ , а  $\sigma_{\max} - \sigma_1 = \sigma_{\max}$ . Вводя обозначение  $\lambda \equiv \sqrt{L_2/L_0}$ , получаем уравнение

$$f_1(\lambda) = f_2(\lambda), \quad (12)$$

где  $f_1(\lambda) = (M_0/M_c)\lambda$ ;  $f_2(\lambda) = 1 + a\lambda^4$ .

Уравнение (12) либо имеет два вещественных корня, либо не имеет ни одного корня (рис. 3). Первый случай реализуется при выполнении неравенства

$$a < M_0/M_c - 1,$$

или

$$\frac{\sigma_{\max} - \sigma_1}{B} \frac{L_0}{z_0} < \frac{M_0}{M_c} - 1. \quad (13)$$

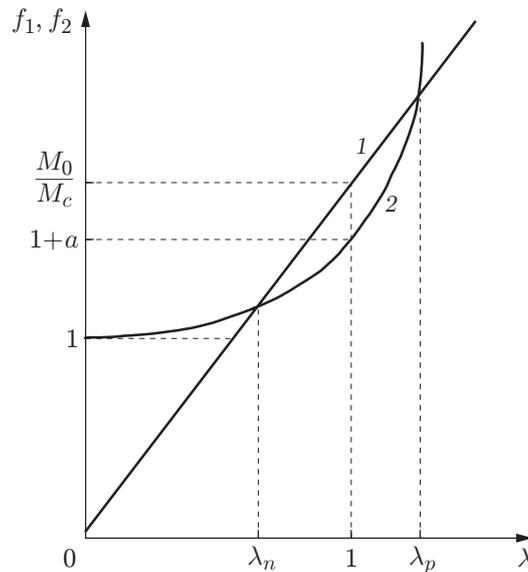


Рис. 3. Графическое решение уравнения (12):  
1 —  $f_1(\lambda)$ , 2 —  $f_2(\lambda)$

Поскольку трещина никогда не схлопывается (ее размер может только увеличиваться), из двух корней следует выбрать  $\lambda_p$ , для которого выполняется неравенство  $\lambda > 1$  (см. рис. 3). Размер трещины  $L_0$  внезапно увеличивается до размера  $\lambda_p^2 L_0$ .

Если разгрузка максимальна, то критерий (13) получается из неравенства  $(\pi/2)P_1\sqrt{L_0} > M_c$  с учетом соотношения (6). Для выполнения критерия (13) необходимо, но не достаточно выполнения критерия Гриффитса  $M_0 > M_c$  в нетронутом пласте. Для разгруженного пласта требуется также, чтобы параметр  $a$  был достаточно мал. Это условие выполняется при большом исходном раскрытии трещины и невысоком уровне максимальной разгрузки, т. е. при не очень большом горном давлении. С увеличением глубины разработки пластовое давление газа обычно увеличивается, что способствует развитию трещин. В то же время раскрытие трещины увеличивается и давление газа в ней падает, что уменьшает возможность роста трещин. По-видимому, существует наиболее опасная глубина разработки газонасыщенных угольных пластов, при которой может начаться рост трещин и произойти выброс.

Таким образом, неравенство (13), при выполнении которого происходит скачкообразный рост трещины, является обобщением критерия Гриффитса на случай, когда разрывающие напряжения создаются газом в полости трещины.

Размер трещины скачкообразно увеличивается с ростом  $M_0/M_c$ , т. е. с увеличением пластового давления, раскрытия и уменьшением модуля сцепления и разгрузки. На рис. 4 представлена зависимость корня квадратного из относительной длины  $\lambda$  от параметра  $a$  при  $M_c/M_0 = 0,8$ . Из рис. 4 следует, что размер трещины может скачкообразно увеличиться более чем в два раза.

Если в пласте (или породе) имеется система параллельных трещин, расположенных на сравнительно малом расстоянии друг от друга, то при внезапном увеличении длины ближайшей к поверхности трещины происходит мгновенная разгрузка материала в окрестности соседней трещины, в результате чего длина этой трещины также резко увеличивается. Далее указанный процесс протекает по принципу домино, вследствие чего происходит внезапный выброс угля, породы и газа путем послойного отрыва [7]. Постепенное прекращение выброса обусловлено, в частности, тем, что нарушается структура системы параллельных трещин.

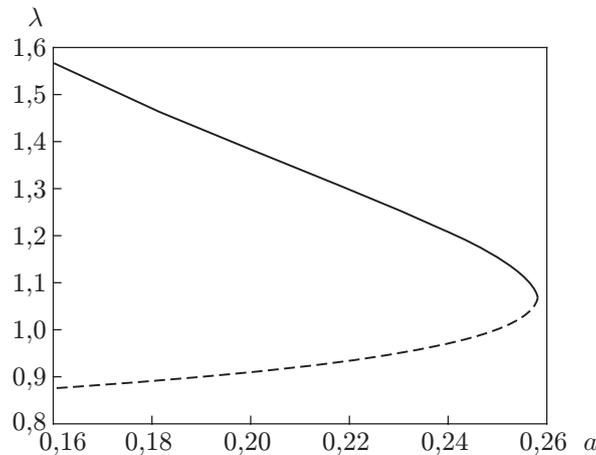


Рис. 4. Численное решение уравнения (12) при  $M_c/M_0 = 0,8$ : сплошная линия — вещественные корни уравнения (12), штриховая — отсутствие корней уравнения (12)

Оценка расстояния между трещинами, при котором может произойти послойный отрыв, проводится на основе неравенства (7). В качестве  $\sigma_1$  следует выбрать величину сжимающих напряжений в трещине, находящейся на расстоянии  $x$  от поверхности ( $x$  — искомое расстояние между трещинами).

Допустимо принять

$$\sigma_1(x) = \sigma_{\max} \frac{x}{h}.$$

Здесь  $h$  имеет порядок толщины пласта. Кроме того, полагая  $P_1 \approx P_0$ , получаем неравенство

$$\frac{\sigma_{\max}}{P_0} \frac{x}{h} < 1 - \frac{M_c}{M_0}. \quad (14)$$

Из приведенных выше оценок следует, что при  $L_0 \approx 20$  см,  $\sigma_{\max}/P_0 \approx 4$ ,  $M_c/M_0 \approx 0,4$   $x < 0,1h$ , т. е. для пласта толщиной 1 м расстояние между трещинами, при котором может произойти послойный отрыв, должно быть менее 10 см.

Неравенство (14) можно рассматривать как один из критериев начала выброса.

Исследуем поведение трещин после увеличения их раскрытия и (или) резкого увеличения их длины.

Вследствие мгновенного увеличения объема трещины после внезапной разгрузки давление газа в ней столь же быстро падает, что приводит к возникновению движущей силы, способствующей затеканию газа в полость трещины из окружающего фильтрационного объема. Для установления закономерностей этого процесса, строго говоря, необходимо решить уравнение диффузионного типа (уравнение Дарси для фильтрации) с соответствующими начальными и граничными условиями. В качестве начального условия задается давление газа в начальный момент как в полости трещины, так и в окружающем ее пространстве. Граничным условием является равенство давлений газа на обоих берегах трещины. Установлено, что при больших размерах трещины практически при всех значениях времени ( $t < L_2/D_f$ , где  $D_f$  — коэффициент фильтрации) справедливо известное в теории уравнений параболического типа [12] “импедансное” соотношение [13], которое в

рассматриваемом случае записывается следующим образом:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{2\gamma L(t)\sqrt{D_f}}{\sqrt{\pi}T} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{P_e(\tau) - P(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau. \quad (15)$$

Здесь  $N(t)$  — количество молекул газа в полости трещины;  $D_f$  — коэффициент фильтрации газа;  $P(t)$  — искомое давление газа в трещине;  $t$  — время;  $\gamma$  — пустотность массива, т. е. отношение объема пустот, занятых газом, к объему массива; множитель 2 учитывает наличие двух берегов трещины;  $P_e(t)$  — давление газа в пространстве, окружающем трещину;  $T$  — абсолютная температура.

К (15) следует добавить уравнение состояния идеального газа

$$P(t)V(t) = N(t)T, \quad (16)$$

которое выполняется в произвольный момент времени для изотермического процесса, а также формулу для объема трещины

$$V(t) = V_0 \left( 1 + a \frac{L^2(t)}{L_0^2} \right). \quad (17)$$

В наиболее простом случае, когда длина трещины не меняется ( $L(t) = L_0$ ), уравнения (21)–(23) позволяют определить в явном виде динамику давления газа в полости трещины. В этом случае имеем

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{2\gamma L_0\sqrt{D_f}}{\sqrt{\pi}V_0(1+a)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{P_e(\tau) - P(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau. \quad (18)$$

Из (18) следует

$$P(t) = P_1 + \frac{2\gamma L_0\sqrt{D_f}}{\sqrt{\pi}V_0(1+a)} \int_0^t \frac{P_e(\tau) - P(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau, \quad (19)$$

где  $P_1$  — давление газа в трещине в начальный момент, определяемое из уравнения (6).

Введем время фильтрации газа в трещину

$$t_f^{(1)} \equiv \frac{\pi(1+a)^2 z_0^2}{4\gamma^2 D_f} \quad (20)$$

и безразмерное время  $\hat{t} = t/t_f^{(1)}$ . Тогда уравнение (19) можно записать в виде (здесь и далее символ “^” опущен):

$$P(t) = P_1 + \int_0^t \frac{P_e(\tau) - P(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau. \quad (21)$$

При  $P_e(t) = P_0 = \text{const}$  получаем уравнение, решение которого записывается в виде

$$P(t) = (P_1 - P_0)(1 - \Phi(\sqrt{\pi t})) e^{\pi t} + P_0 \quad (22)$$

( $\Phi(x)$  — интеграл вероятностей).

Из формулы (22) следует, что на малых временах ( $t \ll 1$ ) давление увеличивается по закону  $P(t) \approx P_1 + 2(P_e - P_1)\sqrt{t}$ , а на больших ( $t \gg 1$ ) стремится к значению  $P_0$  по закону  $P(t) \approx P_0 + 1/\sqrt{t}$ . Поскольку давление  $P_1$  меньше порогового значения, при котором

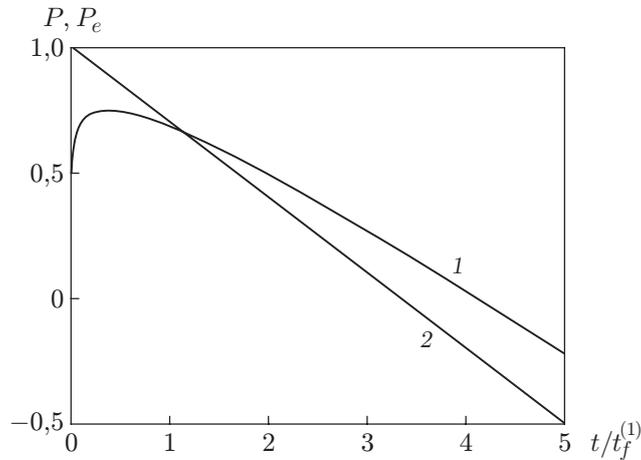


Рис. 5. Зависимости  $P(t)$  (1) и  $P_e(t)$  (2) при численном решении уравнения (21) при условии (23)

происходит страгивание трещины в соответствии с критерием Гриффитса, а давление  $P_0$  больше этого значения, то в некоторый момент текущее давление  $P_2$  становится равным значению, при котором происходит рост трещины. Длительность соответствующей подготовительной стадии порядка  $t_f^{(1)}$  (см. (20)), и она существенно зависит от величины раскрытия трещины, увеличивается с уменьшением пустотности и фильтрационной проницаемости угля, а также по мере разгрузки. По грубым оценкам, величина  $t_f^{(1)}$  может быть порядка нескольких минут, и ее можно считать временем начала выброса.

В общем случае внешнее давление газа  $P_e(t)$  со временем уменьшается вследствие выхода газа через поверхность забоя в выработку [14]. Поэтому решение (22) имеет смысл, если время выхода газа в окружающее пространство значительно больше времени  $t_f^{(1)}$ . Этот вывод подтверждается численным решением уравнения (21), когда сброс внешнего давления моделируется линейной функцией времени:

$$P_e(t) = P_0(1 - \beta t) \quad (23)$$

( $\beta$  — величина, обратная времени выхода газа из пространства, окружающего трещину).

Из рис. 5 следует, что при  $\beta t_f^{(1)} \ll 1$  давление  $P(t)$  при  $t/t_f^{(1)} < 1$  или  $t/t_f^{(1)} \approx 1$  меняется незначительно. В частности, на малых временах давление в трещине увеличивается по закону  $\sqrt{t}$ , т. е. очень быстро, несмотря на уменьшение давления в пространстве, окружающем трещину. В качестве оценки времени выхода газа из зоны ориентированных трещин можно принять величину  $l_0^2/D_f$  ( $l_0 = 3 \div 5$  м). При  $D_f \approx 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с эта величина порядка 1 сут, т. е. значительно больше  $t_f$ .

Следовательно, при выполнении неравенства  $M_0 > M_c$  и в случае полной разгрузки магистральная ориентированная трещина, несмотря на увеличение ее объема вследствие разгрузки и соответственно падения давления в ней, растет, но с определенной задержкой на время  $t_f^{(1)}$ , обусловленной фильтрацией газа из пространства, окружающего трещину, в ее полость.

На следующем этапе развитие трещины определяется затеканием газа в движущуюся трещину. Предположим, что на этом этапе в любой момент времени выполняется равенство Гриффитса

$$\frac{\pi}{2} P(t) \sqrt{L(t)} = M_c. \quad (24)$$

Тогда из (15)–(17) следует соотношение

$$\frac{1}{L(t)} \frac{d}{dt} \left[ P(t) V_0 \left( 1 + \frac{aL^2(t)}{L_0^2} \right) \right] = \frac{2\gamma\sqrt{D_f}}{\sqrt{\pi}} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{P_e(\tau) - P(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau.$$

Как и выше, будем считать, что  $P_e(t) = P_0$ . В этом случае давление следует измерять в единицах  $P_0$ , т. е.  $p(t) \equiv P(t)/P_0$ , а время — в единицах

$$t_f^{(2)} = \frac{\pi z_0^2}{4\gamma^2 D_f} \left( \frac{M_0}{M_c} \right)^2.$$

С учетом равенства (24) получаем соотношение

$$p^2(t) \frac{d}{dt} \left[ p(t) \left( 1 + \frac{aM_c^4}{M_0^4 p^4(t)} \right) \right] = \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{1-p(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau, \quad (25)$$

где для безразмерного времени  $t/t_f^{(2)}$  используется то же обозначение, что и для размерного.

Дальнейшие преобразования выполняются для исключения производных из уравнения (25). В результате получаем уравнение

$$\frac{1}{3} (p^3(t) - p_2^3) + a \left( \frac{M_c}{M_0} \right)^4 \left( \frac{1}{p(t)} - \frac{1}{p_2} \right) = \int_0^t \frac{1-p(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau, \quad (26)$$

где  $p_2$  — давление в момент окончания предыдущего этапа (давление после внезапного увеличения длины трещины, определяемое из системы (9)–(11) (вариант 2), либо давление после увеличения раскрытия трещины в процессе фильтрации (вариант 1)).

Поскольку длина трещины может только увеличиваться, из (24) следует, что давление газа в ней на рассматриваемом этапе может только уменьшаться. Найдем асимптотику решения (26) на малых и больших временах. При  $t = 0$   $p(0) = p_2$ . Для приращения давления  $\Delta p$  при  $t \ll 1$  имеем

$$\left( p_2^2 - \frac{aM_c^4}{M_0^4 p_2^2} \right) \Delta p = 2(1-p_2)\sqrt{t}, \quad (27)$$

т. е. на малых временах давление очень быстро (пропорционально  $\sqrt{t}$ ) изменяется и в соответствии с (24) длина трещины быстро увеличивается.

Как указано выше,  $\Delta p < 0$ , а поскольку в правой части выражения (27) стоит положительная величина, должно выполняться неравенство

$$p_2^4 < a(M_c/M_0)^4,$$

или

$$p_2 < a^{1/4} M_c/M_0. \quad (28)$$

В случае выполнения критериального неравенства (28) реализуется рассматриваемый этап развития трещины, когда ее длина увеличивается, а давление газа в ней падает. В случае выполнения обратного неравенства происходит мгновенное разрушение в соответствии с критерием Гриффитса.

Определим закон увеличения длины трещины и уменьшения давления газа в ней при  $t \gg 1$ . В этом случае можно предположить, что давление газа в трещине уменьшается

до нуля. Поэтому наибольшим слагаемым в левой части (26) является слагаемое  $1/p(t)$ , остальными слагаемыми можно пренебречь. В правой части слагаемое  $p(t)$  пренебрежимо мало по сравнению с единицей. В результате получаем

$$p(t) \approx \left(\frac{M_c}{M_0}\right)^4 \frac{2a}{\sqrt{t}}. \quad (29)$$

Решение (29) подтверждает правильность принятой асимптотики давления на больших временах.

Согласно (28) и с учетом введенного безразмерного времени  $t/t_f$  имеем

$$L(t) \equiv V_L t \approx L_0 \frac{M_0^6}{4a^2 M_c^6} \frac{t}{t_f^{(2)}},$$

т. е. трещина движется с постоянной скоростью  $V_L$ . Эта скорость порядка 1 м/мин.

Таким образом, после внезапной разгрузки развитие магистральной трещины происходит следующим образом.

При  $(\pi/2)P_0\sqrt{L_0} \equiv M_0 < M_c$  длина трещины не увеличивается, незначительно увеличивается только величина ее раскрытия, давление в трещине уменьшается до значения  $P_1 = P_0/(1+a)$ , а затем в нее затекает газ. Если газ не выходит за пределы пласта, то в результате затекания давление в трещине восстанавливается до значения  $P_0$ .

Если  $M_0 > M_c$ , то возможны различные варианты развития трещины.

1. При  $a > M_0/M_c - 1$  непосредственно после разгрузки и сброса давления начинается процесс затекания газа, продолжающийся до момента, в который будет выполнено равенство Гриффитса  $p_2 \equiv P_2/P_0 = M_c/M_0$ .

1.1. Если выполняется неравенство (28), т. е.  $a > 1$ , то затекание будет продолжаться, но в этом случае размер трещины будет увеличиваться до тех пор, пока не произойдет разрушение.

1.2. Если неравенство (28) не выполняется, т. е.  $a < 1$ , то непосредственно после затекания произойдет разрушение.

2. При  $a < M_0/M_c - 1$  задача сводится к анализу равенств  $p\lambda = M_c/M_0$ ,  $\lambda/(1+a\lambda^4) = M_c/M_0$  и неравенства (28).

2.1. Если  $a > (1/16)(M_0/M_c)^4$ , то непосредственно после разгрузки размер трещины резко увеличивается от  $L_0$  до  $L_2$ , давление скачкообразно уменьшается до значения  $P_2$  (12), после чего она растет до момента разрушения материала, при этом согласно (29) давление в ней становится равным нулю, несмотря на затекание газа.

2.2. Если  $a < (1/16)(M_0/M_c)^4$ , то трещина мгновенно прорастает сквозь пласт.

На рис. 6 показаны построенные в плоскости  $(a, M_0/M_c)$  области, соответствующие различным вариантам развития трещин. Диаграмма построена для случая полной разгрузки участка пласта, где находится трещина. В случае частичной разгрузки в эту диаграмму необходимо внести некоторые изменения, однако качественно картина не меняется.

При исследовании фильтрации следует учитывать истощение угольной матрицы вследствие фильтрации газа в выработанное пространство и в окружающие породы.

Таким образом, для начала выброса необходимы большое пластовое давление газа; наличие системы трещин большой длины и с большим раскрытием, расположенных на определенном расстоянии друг от друга; внезапная разгрузка, близкая к максимальной; малый коэффициент фильтрации газа через поверхность забоя, уголь или породу с малой удельной поверхностной энергией. Полученный критерий в виде неравенства (13) может быть использован при оценке выбросоопасности отдельных участков угольных пластов.

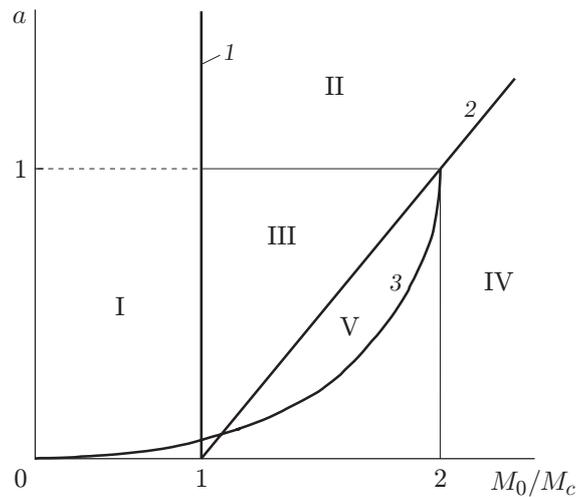


Рис. 6. Области, соответствующие различным вариантам развития трещин: I — область значений параметров, при которых отсутствует рост трещин ( $M_0/M_c < 1$ ), II — область значений параметров, при которых рост трещин происходит за счет фильтрации газа в их полость ( $a > 1, a > M_0/M_c - 1$ ), III — область значений параметров, при которых происходит мгновенное прорастание трещин после затекания газа ( $M_0/M_c - 1 < a < 1$ ), IV — область значений параметров, при которых происходит мгновенное увеличение длины трещины, а затем ее увеличение за счет фильтрации ( $(1/16)(M_0/M_c)^4 < a < M_0/M_c - 1$ ), V — область значений параметров, при которых происходит мгновенное увеличение трещины при отсутствии фильтрации ( $a < (1/16)(M_0/M_c)^4, a < M_0/M_c - 1$ ); 1 —  $M_0/M_c = 1$ , 2 —  $a = M_0/M_c - 1$ , 3 —  $a = (1/16)(M_0/M_c)^4$

Входящие в это неравенство параметры определяются по результатам натуральных и лабораторных экспериментов. Получены оценки, позволяющие определить время, необходимое для проведения спасательных работ по выводу горнорабочих из очага начавшегося выброса.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Ходот В. В.** Внезапные выбросы угля и газа. М.: Госгортехиздат, 1961.
2. **Айруни А. Т.** Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах. М.: Наука, 1987.
3. **Alekseev A. D., Feldman E. P.** Non-equilibrium thermodynamics and outburst hazard of a coal bed // Ukr. J. Phys. 2012. V. 57, N 6. P. 619–622.
4. **Петухов И. М.** Механика горных ударов и выбросов / И. М. Петухов, А. М. Линьков. М.: Недра, 1983.
5. **Алексеев А. Д.** Физика угля и горных процессов. Киев: Наук. думка, 2010.
6. **Шевелев Г. А.** Динамика выбросов угля, породы и газа. Киев: Наук. думка, 1989.
7. **Христианович С. А., Салганик Р. Л.** Выбросоопасные ситуации. Дробление. Волна выброса. М., 1980. (Препр. / АН СССР. Ин-т проблем механики; № 152).
8. **Христианович С. А., Салганик Р. Л.** Внезапные выбросы угля (породы) и газа. Напряжения и деформации. М., 1979. (Препр. / АН СССР. Ин-т проблем механики; № 153).
9. **Христианович С. А.** Свободное течение грунтовой массы, вызванное расширением содержащегося в порах газа высокого давления. Волна дробления. М., 1979. (Препр. / АН СССР. Ин-т проблем механики; № 128).

10. **Griffith A. A.** The phenomenon of rupture and flow in solids // Philos. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A. 1920. V. 221. P. 163–198.
11. **Баренблатт Г. И.** Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении // ПМТФ. 1961. № 4. С. 3–56.
12. **Араманович И. Г.** Уравнения математической физики / И. Г. Араманович, В. И. Левин. М.: Наука, 1969.
13. **Feldman E. P., Yurchenko V. M., Krajnikov A. V., Williams D. B.** Non-uniform interfacial impurity segregation // Surface Sci. 2003. V. 545. P. 99–108.
14. **Alexeev A. P., Feldman E. P., Vasilenko T. A.** Kinetics of methane desorption from coal nano- and meso-structures // Energy Fuels. 2010. V. 24. P. 4375–4379.

*Поступила в редакцию 22/VII 2015 г.,  
в окончательном варианте — 11/I 2016 г.*

---