

УДК 622.831: 622.537.86

ЭВОЛЮЦИЯ ТРЕЩИН НА КРАЕВОМ УЧАСТКЕ ГАЗОНАСЫЩЕННОГО УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ ЕГО СТАЦИОНАРНОЙ ОТРАБОТКЕ

Э. П. Фельдман, Н. А. Калугина, О. В. Чеснокова

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

E-mails: edward.feldman.40@gmail.com, kalugina_n_a@ukr.net, chesnokova0507@gmail.com

Рассматриваются условия, при которых может произойти разрыв угольного или породного пласта газом, заключенным в полости магистральной трещины, находящейся на краевом участке пласта. Строится кинетическая теория двух конкурирующих физических процессов: разгрузки пласта в результате действия горного давления и фильтрации газа из полости трещины в окружающий массив. Первый процесс способствует разрыву, второй — уменьшению давления газа, вызывающего разрыв. Эволюция трещины определяется соотношением скоростей этих процессов. Установлено, что для разрыва пласта необходимо, но недостаточно выполнения модифицированного критерия Гриффитса. Для разрыва пласта необходимо также, чтобы отношение скорости разгрузки к скорости фильтрации превышало определенное пороговое значение.

Ключевые слова: газ, давление, трещина, фильтрация, разрыв, пласт, стационарная разгрузка.

DOI: 10.15372/PMTF20190319

Введение. В угольном пласте всегда имеются трещины с различной ориентацией, размерами и раскрытием. В нетронутом газонасыщенном пласте трещины не эволюционируют, поскольку они “сдавлены” горным давлением, которое в несколько раз превышает пластовое давление газа. При отработке пласта происходит перераспределение напряжений, обусловленных воздействием горного давления. Для горизонтально залегающего пласта, исследуемого в данной работе, вертикальная компонента напряжений является опорным давлением [1], которое изменяется вдоль пласта, достигая максимума на расстоянии от рабочей поверхности забоя порядка нескольких толщин пласта. Горизонтальная компонента напряжений, являющаяся поперечной относительно этой поверхности, исчезает на ней (точнее, равна давлению газа в выработанном пространстве), а по мере продвижения вглубь пласта увеличивается, достигая предельного значения, характерного для нетронутого пласта. Сжимающие напряжения, действующие на трещины вблизи забоя, уменьшаются. Горизонтально залегающие, а также наклонные трещины по-прежнему “сдавлены” горным давлением и не эволюционируют. Следовательно, имеет смысл рассматривать лишь эволюцию “поперечных” трещин. Сжимающие поперечные напряжения могут сниматься как внезапно, при отработке пласта взрывом, так и постепенно, при стационарной

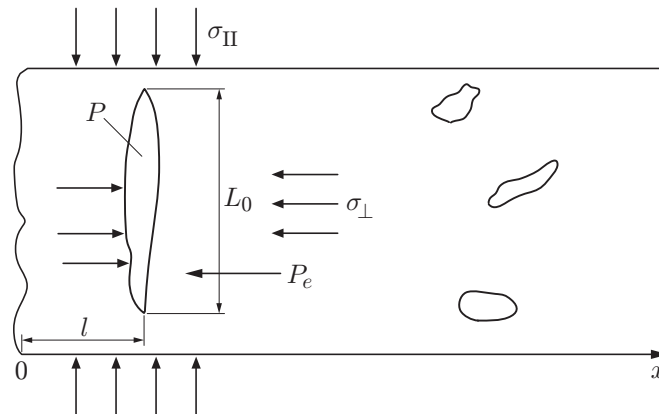


Рис. 1. Схема расположения трещины в газонасыщенном угольном пласте

отработке пласта с определенной скоростью продвижения забоя. В обоих случаях происходит развитие краевых трещин за счет разрывного действия газа, находящегося в их полости.

Однако характер эволюции трещин для двух указанных видов отработки существенно различается. Первый случай (внезапная разгрузка пласта от поперечных напряжений) рассмотрен в работе [2]. В данной работе исследуется эволюция трещин при движении поверхности забоя с постоянной скоростью. Как и в [2], теория эволюции системы трещин строится с использованием понятия среднего поля. Суть этой теории состоит в том, что вместо системы трещин рассматривается одна магистральная трещина. Остальные трещины формируют среднее поле напряжений в окрестности магистральной трещины, при этом образуется резервуар газа, которым окружающая среда может обмениваться с трещиной. В свою очередь, магистральная трещина воздействует на параметры окружающей среды.

Развитие трещины происходит за счет как постепенной разгрузки [3], так и втекания или истечения газа из полости трещины в окружающую среду (уголь). Особенности изменения давления в газонасыщенном угольном пласте с учетом термодинамических условий и геотехнологических характеристик его отработки изучались в [4, 5]. Отработка газоугольного пласта сопровождается не только перераспределением горного давления, но и возникновением и перемещением поверхности, через которую газ (обычно метан) вытекает из пласта в выработанное пространство. Давление газа в пласте падает, вследствие чего появляется термодинамическая сила, вызывающая истечение газа из полости трещин в окружающую среду. В результате изменяется разрывающая нагрузка на берегах трещины, а значит, и скорость ее эволюции.

1. Эволюция магистральной трещины в отсутствие фильтрации газа. Схема расположения магистральной трещины в отработываемом угольном пласте приведена на рис. 1, взятом из работы [2]. В момент времени, выбранный в качестве начального ($t = 0$), трещина располагается на расстоянии l от рабочей поверхности забоя. Предполагается, что “поперечные” напряжения σ_{\perp} линейно зависят от координаты x (см. рис. 1):

$$\sigma_{\perp}(x) = -\sigma_m x/l, \quad 0 < x < l; \tag{1}$$

$$\sigma_{\perp}(x) = -\sigma_m, \quad x > l. \tag{2}$$

Здесь знак “минус” соответствует сжимающим напряжениям; l — размер зоны разгрузки; σ_m — “поперечные” напряжения (напряжения бокового распора) в нетронутым пласте, равные половине величины горного давления. При отработке пласта расстояние от по-

верхности забоя до трещины уменьшается по линейному закону

$$x = l - vt = l(1 - vt/l), \quad (3)$$

где v — скорость продвижения забоя.

В соответствии с (1) напряжение бокового распора на трещине в произвольный момент времени равно

$$\sigma_{\perp}(t) = -\sigma_m(1 - vt/l). \quad (4)$$

В начальный момент $\sigma_{\perp}(t) = -\sigma_m$, т. е. разгрузка отсутствует, степень сжатия трещин является максимальной. В момент $t = l/v$ напряжение σ_{\perp} обращается в нуль и трещина “поглощается” забоем.

Согласно теории трещин [6] изменение объема трещины при воздействии на ее берега напряжений пропорционально этим напряжениям и площади трещины. В двумерном случае зависимость объема трещины от времени выражается следующим образом:

$$V(t) = V_0 + \frac{\sigma_m}{B} L_0^2 + \frac{\sigma_{\perp}(t)}{B} L^2(t). \quad (5)$$

Здесь V_0 — начальный объем полости трещины (в плоской задаче площадь сечения трещины); B — модуль упругости угля; L_0 — начальная длина трещины; $L(t)$ — длина трещины в момент времени t .

В формуле (5) не учтено влияние пластового давления газа, распирающего трещину, на ее объем, поскольку давление газа в несколько раз меньше сжимающих “поперечных” напряжений.

Введем безразмерные время $\tau \equiv vt/l$, начальное раскрытие трещины $z_0 = V_0/L_0$ и параметр $a_m \equiv \sigma_m L_0^2 / (B V_0) \equiv \sigma_m L_0 / (B z_0)$. Тогда зависимость объема трещин (в двумерном случае — площади) от времени принимает вид

$$V(t) = V_0(1 + a_m - a_m(1 - \tau)L^2(\tau)/L_0^2). \quad (6)$$

Если в процессе эволюции длина трещины не меняется, т. е. $L(\tau) = L_0$, то формула (6) упрощается:

$$V(\tau) = V_0(1 + a_m\tau).$$

Таким образом, объем полости трещины, а следовательно, и ее раскрытие увеличиваются по мере разгрузки пласта. Поскольку исходная трещина уже сформирована, ее берега не схлопываются, трещина не “залечивается”, объем ее полости и величины раскрытия конечны даже при больших сжимающих напряжениях.

В отсутствие фильтрации количество газа в полости трещины не меняется, поэтому согласно уравнению состояния идеального газа (метан полагается идеальным газом) имеем

$$P(\tau)V(\tau) = P_0V_0$$

(P_0 — пластовое давление газа (начальное давление газа в полости трещины); $P(\tau)$ — давление в произвольный момент времени).

Следовательно,

$$P(\tau) = P_0V_0/V(\tau).$$

При $L(\tau) = L_0$ имеем соотношение

$$P(\tau) = P_0/(1 + a_m\tau), \quad (7)$$

т. е. давление газа в трещине уменьшается, становясь равным $P_0/(1 + a_m)$ при $\tau = 1$ (момент “поглощения” трещины забоем).

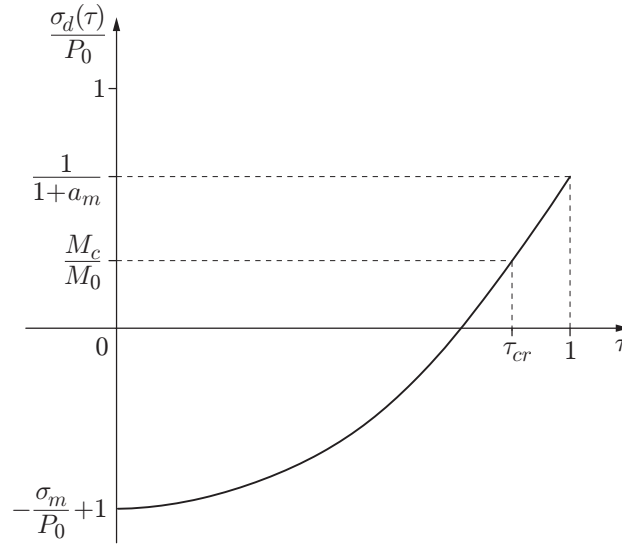


Рис. 2. Зависимость полной нагрузки от времени

Полная нагрузка на берега трещины представляет собой сумму давления газа (растягивающего) и сжимающих напряжений:

$$\sigma_d(\tau) = P(\tau) + \sigma_{\perp}(\tau).$$

С учетом (4), (7) имеем

$$\sigma_d(\tau) = P_0/(1 + a_m\tau) - \sigma_m(1 - \tau).$$

В начальный момент полная нагрузка сжимает трещину: $\sigma_d(0) = P_0 - \sigma_m$. Как отмечено выше, значение σ_m в несколько раз больше P_0 .

По мере разгрузки сжимающие напряжения уменьшаются, в определенный момент суммарная нагрузка становится растягивающей, достигая наибольшего значения $P_0/(1 + a_m)$ при $\tau = 1$. Зависимость полной нагрузки (нормированной на P_0) от времени приведена на рис. 2.

Согласно критерию Гриффитса [6, 7] разрыв трещины происходит, в случае если коэффициент концентрации напряжений в вершине трещины превышает модуль сцепления материала M_c :

$$(\pi/2)\sigma_d(\tau)\sqrt{L(\tau)} \geq M_c. \tag{8}$$

Поскольку на этапе разгрузки длина трещины не меняется: $L(\tau) = L_0$, разрыв происходит в момент $\tau = \tau_{cr}$, определяемый из уравнения

$$\frac{\sigma_d(t)}{P_0} = \frac{M_c}{M_0}, \quad M_0 = \frac{\pi}{2} P_0 \sqrt{L}. \tag{9}$$

Графическое решение уравнения приведено на рис. 2. Видно, что необходимым условием существования критического времени в интервале $\tau < 1$ является выполнение неравенства

$$\frac{1}{1 + a_m} > \frac{M_c}{M_0}. \tag{10}$$

Неравенство (10) является обобщенным критерием Гриффитса разрыва материала трещиной, полученным в работе [2] иным способом. Разрыв материала трещиной может произойти лишь при действии растягивающих напряжений, превышающих критическое значение

(см. (8)). Сжимающая нагрузка также создает концентрацию напряжений вблизи вершины трещины, однако это не приводит к изменению ее длины, поскольку берега трещины сближаются, но никогда не смыкаются. Эволюция трещины под действием сжимающих напряжений сводится к изменению величины ее раскрытия.

Критическое время τ_{cr} близко к единице, поэтому

$$1 - \tau_{cr} \approx \frac{P_0}{\sigma_m} \left(\frac{1}{1 + a_m} - \frac{M_c}{M_0} \right). \quad (11)$$

Зависимость (11) обусловлена тем, что $P_0 < \sigma_m$, а также, возможно, тем, что $(1 + a_m)^{-1} \approx M_c/M_0$.

После достижения критического значения нагрузки в соответствии с критерием Гриффитса развитие трещины может происходить по двум сценариям. В соответствии с первым сценарием в момент достижения критического значения нагрузки происходит мгновенный разрыв пласта магистральной трещиной. Согласно второму сценарию при увеличении нагрузки длина и объем трещины увеличиваются, давление в ней падает, поэтому в любой момент $\tau > \tau_{cr}$ выполняется критерий Гриффитса

$$(\pi/2) \sigma_d(\tau) \sqrt{L(\tau)} = M_c = \text{const}.$$

Однако результаты исследования, основанного на анализе неравенства (8) с учетом (6) при $L(\tau)$, близком к L_0 , показывают, что вследствие монотонного возрастания функции $\sigma_d(\tau)$ длина трещины должна монотонно убывать, т. е. $L(\tau) < L_0$, что не имеет физического смысла. Таким образом, при выполнении критерия (10) в отсутствие фильтрации газа при приближении забоя к магистральной трещине в момент $\tau = \tau_{cr}$ произойдет скачкообразный рост трещины, что может привести к внезапному выбросу угля и газа.

Согласно (10) выбросу способствуют большое пластовое давление, малые силы сцепления материала, обусловленные низкой удельной поверхностной энергией, большая начальная величина раскрытия. Существует наиболее опасная по выбросу величина L_0 . При значениях $L < L_0$ и $L > L_0$ выбросоопасность снижается.

Численно оценим выбросоопасность в отсутствие фильтрации при следующих значениях параметров: $P_0 = 5 \cdot 10^6$ Па, $L_0 = 0,2$ м, $B = 10^{10}$ Па, $\sigma_m = 2 \cdot 10^7$ Па, $z_0 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м [1, 6, 8, 9].

Что касается модуля сцепления M_c , то он оценивается формулой $M_c = \sqrt{B\chi}$, где χ — удельная поверхностная энергия угля. Согласно оценке, приведенной в [10], $\chi = 4$ Дж/м². Следовательно,

$$\frac{1}{1 + \sigma_m L_0 / (B z_0)} \approx 0,56, \quad \frac{M_c}{M_0} = \frac{\sqrt{B\chi}}{(2/\pi) P_0 \sqrt{L_0}} \approx 0,03.$$

Таким образом, при указанных выше значениях параметров в отсутствие фильтрации критерий (10) Гриффитса выполняется.

2. Изменение давления газа в окрестности магистральной трещины и в ее полости при равномерном движении забоя. Выше фильтрацией газа, содержащегося в пласте, пренебрегалось. 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 в окрестности трещины, уменьшается. В свою очередь, это приводит к появлению термодинамической силы, а именно разности давлений в трещине и ее окрестности, что обуславливает истечение газа из полости трещины. Давление газа в трещине падает, что препятствует ее развитию. Для того чтобы определить давление газа $P(\tau)$ в полости трещины, необходимо выяснить, по какому закону меняется давление газа $P_e(\tau)$ в угольной матрице вблизи трещины.

Рассмотрим уравнение, которому удовлетворяет зависимость давления газа в угольном пласте от пространственной координаты и времени:

$$\frac{\partial P_e(x, t)}{\partial t} = D_f \frac{\partial^2 P_e(x, t)}{\partial x^2}. \quad (12)$$

Здесь D_f — коэффициент фильтрации газа, характеризующий проницаемость угля при фильтрации метана.

Уравнение (12) является уравнением диффузионного типа, которому удовлетворяет давление газа при его вязком течении (течение Кнудсена). Полученные ниже результаты справедливы также для течений газа другого типа.

Для уравнения (12) принимается начальное условие, согласно которому в начальный момент ($t = 0$) давление газа всюду одинаково и равно P_0 , т. е. пластовому давлению в нетронутом пласте:

$$P_e(x, 0) = P_0.$$

Естественными граничными условиями являются равенство нулю давления на поверхности забоя и стремление давления P_e к P_0 при больших x :

$$P_e(0, t) = 0, \quad P_e(\infty, t) = P_0.$$

Далее давление будем измерять в единицах P_0 . При этом вид уравнения не меняется, а начальное и граничные условия записываются следующим образом:

$$p_e(x, 0) = 1, \quad p_e(0, t) = 0, \quad p_e(\infty, t) = 1.$$

Решение этой задачи можно получить, например, применяя преобразование Лапласа. В результате имеем

$$p_e(x, t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{y} \exp\left(-\frac{tD_f y^2}{x^2}\right) \sin y \, dy. \quad (13)$$

Следует учитывать, что забой движется со скоростью v , поэтому согласно формуле (3) расстояние между забоем и трещиной x равно $l - vt$. Подставляя $x = l - vt$ в (13), вводя безразмерный параметр

$$b \equiv D_f/(lv)$$

и используя безразмерное время τ , получаем формулу, определяющую зависимость пластового давления газа вблизи трещины от времени

$$p_e(\tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{y} \exp\left(-\frac{b\tau y^2}{(1-\tau)^2}\right) \sin y \, dy. \quad (14)$$

Следует отметить, что параметр b , определяющий скорость выхода метана из окружающего трещину материала, становится малым при слабой фильтрации и большой скорости продвижения забоя. Для получения количественных результатов выполним асимптотический анализ формулы (14).

Согласно [11]

$$\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{y} \exp(-ay^2) \sin y \, dy = \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2\sqrt{a}}\right), \quad (15)$$

где $\operatorname{erf}(x)$ — функция ошибок.

Используя (14), (15), получаем следующее выражение для давления газа в окрестности магистральной трещины:

$$p_e(\tau) = \operatorname{erf}((1 - \tau)/(2\sqrt{b\tau})). \quad (16)$$

Асимптотики функции $\operatorname{erf}(x)$ при малых и больших значениях ее аргумента известны. С использованием этих асимптотик находим

$$p_e(\tau) \approx \begin{cases} (1 - \tau)/(\sqrt{\pi}\sqrt{b\tau}), & (1 - \tau)/(2\sqrt{b\tau}) \ll 1, \\ 1 - 2\sqrt{b\tau}/(\sqrt{\pi}(1 - \tau)) \exp(-(1 - \tau)^2/(4b\tau)), & (1 - \tau)/(2\sqrt{b\tau}) \gg 1. \end{cases} \quad (17)$$

Рассмотрим поведение функции $p_e(\tau)$ при $b \ll 1$ (медленная фильтрация) и $b \gg 1$ (быстрая фильтрация).

В случае медленной фильтрации не только $b \ll 1$, но и $b\tau \ll 1$ при всех τ , поскольку $\tau < 1$. Поэтому нормированное давление $p_e(\tau)$ практически равно единице, т. е. согласно второй формуле в (17) давление p_e приближается к P_0 по экспоненциальному закону для всех τ , за исключением $\tau \approx 1$, для которых

$$1 - \tau < 2\sqrt{b}.$$

Начиная с этого критического момента, в который выполняется неравенство

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

давление $p_e(\tau)$ уменьшается до нуля почти по линейному закону

$$p_e(t) \approx (1 - \tau)/\sqrt{\pi b}.$$

В случае быстрой фильтрации давление в окрестности трещины близко к нулю ($p_e(\tau) \approx 1/b$) для всех значений τ , за исключением $\tau < 1/b$, при которых $p_e(\tau) \approx 1$. Таким образом, на временном интервале $0 \leq \tau < 1/b$ давление быстро уменьшается от значения P_0 до нуля.

На рис. 3 представлена зависимость давления от времени $p_e(\tau)$ при различных значениях b (сплошные линии). При любой скорости фильтрации давление газа в окрестности трещины сначала практически равно P_0 , давление в полости трещины также очень близко к P_0 . При этом истечение газа в выработанное пространство не оказывает влияния на давление в окрестности трещины и в ее полости. Затем возникает термодинамическая сила (разность давлений $p(\tau) - p_e(\tau)$ в полости трещины и ее окрестности) и давление в трещине падает. Постепенное уменьшение давления в полости трещины описывается уравнением, близким к приведенному в [2]:

$$p(t) = 1 - \frac{2\gamma\sqrt{D_e}}{\sqrt{\pi}z_0} \int_0^t \frac{p(t) - p_e(t')}{\sqrt{t - t'}} dt'. \quad (18)$$

Здесь γ — пустотность угля (породы); z_0 — исходная величина раскрытия трещины; D_e — коэффициент фильтрации в окрестности трещины. Вообще говоря, этот коэффициент отличается от коэффициента фильтрации на призабойном участке. Вводя безразмерное время $\tau \equiv vt/l$ и параметр $b \equiv \sqrt{D_f/(vl)}$, уравнение (18) можно записать следующим образом:

$$p(\tau) = 1 - \lambda \sqrt{\frac{D_e}{D_f}} \sqrt{b} \int_0^\tau \frac{p(\tau) - p_e(\tau')}{\sqrt{\tau - \tau'}} d\tau'. \quad (19)$$

Здесь $\lambda \equiv 2\gamma l/(\sqrt{\pi}z_0)$.

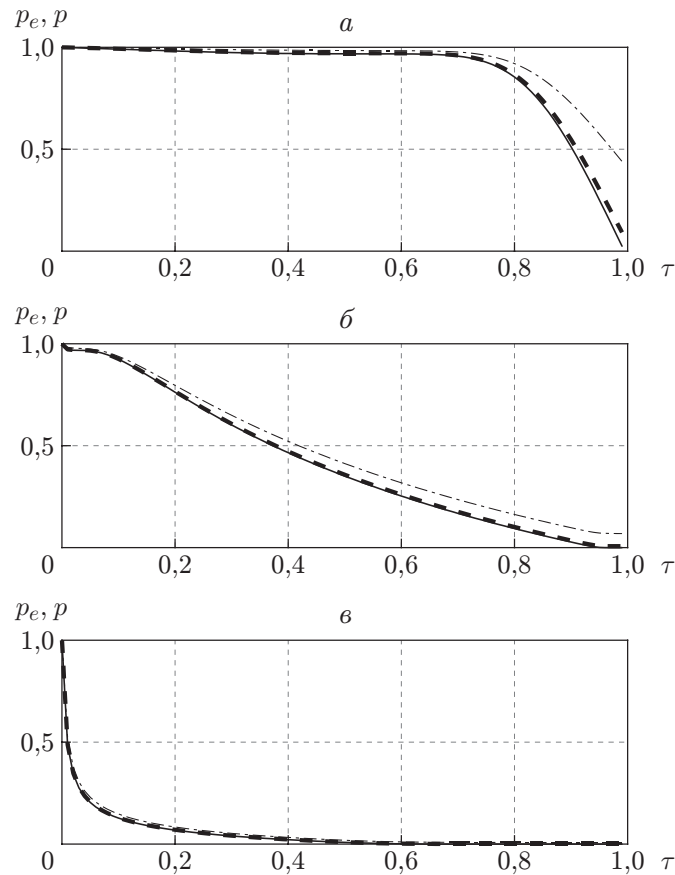


Рис. 3. Зависимость давления газа от времени при различных значениях параметра b :

a — $b = 0,01$, $б$ — $b = 1$, $в$ — $b = 100$; сплошные линии — давление $p_e(\tau)$ в окрестности магистральной трещины, штриховые — давление $p(\tau)$ в полости трещины при $D_e/D_f = 1$, штрихпунктирные — давление $p(\tau)$ в полости трещины при $D_e = 10^{-2}D_f$

Интегральное уравнение (19) для $p(\tau)$ решалось численно при $\gamma = 0,03$, $l = 2$ м, $z_0 = 10^{-3}$ м, зависимость $p_e(\tau)$ определялась формулой (16). Расчеты проводились для отношения $D_e/D_f = 1$ либо $D_e/D_f = 10^{-2}$. Результаты расчетов представлены на рис. 3. Видно, что штриховая линия ($D_e = D_f$) почти совпадает со сплошной. Если фильтрация вблизи трещины практически отсутствует вследствие воздействия опорного давления, то давление газа в полости трещины отличается от P_0 лишь на небольшом временном промежутке до “поглощения” трещины забоем.

3. Эволюция магистральной трещины при наличии фильтрации. По мере движения забоя происходит как разгрузка берегов трещины от сжимающих напряжений, так и истечение газа в полость трещины, сопровождающееся падением давления газа. Полная нагрузка на берега трещины представляет собой сумму давления газа в полости $p(\tau)$ и сжимающих напряжений $(\sigma_m/P_0)(1 - \tau)$ (все нагрузки нормированы на P_0). Сброс горного давления приводит к увеличению разрывающей нагрузки, а фильтрация — к ее уменьшению.

При определенных условиях растягивающая нагрузка увеличится настолько, что коэффициент концентрации напряжений в вершине трещины станет больше модуля сцепления материала, в результате чего согласно критерию Гриффитса трещина разорвет пласт и произойдет внезапный выброс. Критический момент и критическое давление определя-

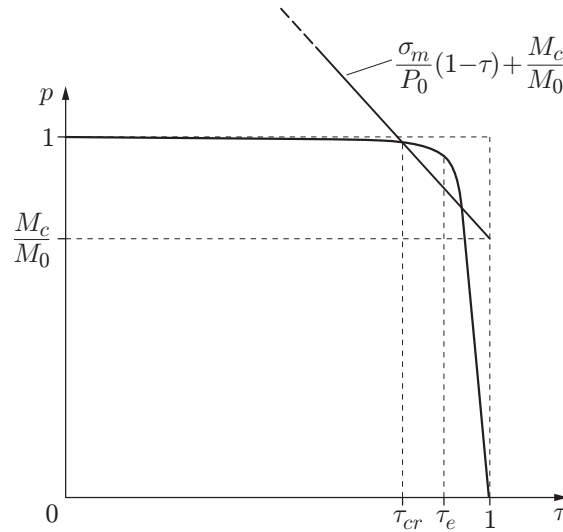


Рис. 4. Графическое решение уравнения (21)

ются уравнением

$$p(\tau) - \frac{\sigma_m}{P_0} (1 - \tau) = \frac{M_c}{M_0}, \quad (20)$$

для которого уравнение (9) является частным случаем.

Запишем уравнение (20) следующим образом:

$$p(\tau) = \frac{\sigma_m}{P_0} (1 - \tau) + \frac{M_c}{M_0}. \quad (21)$$

Если существует решение этого уравнения на интервале $0 \leq \tau \leq 1$, то существует момент, в который трещина разрывает пласт. Если решение отсутствует или не имеет физического смысла, то произойдет лишь раскрытие трещины без разрыва пласта. Таким образом, необходимо найти критерий существования решения (21).

Выполним графический анализ уравнения (21) в случае, когда зависимость $p(\tau)$ совпадает с зависимостью $p_e(\tau)$.

Схематически график правой и левой частей уравнения (21) показан на рис. 4. Будем считать, что $b \ll 1$. На рис. 4 показаны точка τ_{cr} пересечения прямой $(\sigma_m/P_0)(1 - \tau) + M_c/M_0$ с прямой $p(\tau) = 1$ и точка τ_e , в которой зависимость $p(\tau)$ отклоняется от зависимости $p(\tau) = 1$. Можно утверждать, что решение (21) существует тогда и только тогда, когда точка τ_e лежит правее точки τ_{cr} , т. е. когда падение горного давления, в результате которого увеличивается разрывающая нагрузка, не компенсируется уменьшением нагрузки вследствие наличия фильтрации:

$$1 - \tau_e < 1 - \tau_{cr}.$$

Учитывая, что $1 - \tau_e \approx 2\sqrt{b}$, $1 - \tau_{cr} = (P_0/\sigma_m)(1 - M_c/M_0)$, получаем критерий разрушения пласта магистральной трещиной в следующем виде:

$$\sqrt{b} < \frac{P_0}{2\sigma_m} \left(1 - \frac{M_c}{M_0}\right).$$

Как отмечено выше, этот критерий не учитывает раскрытие трещин. Для учета данного фактора используем формулу (11), определяющую критический момент $1 - \tau_{cr}$. В результате получаем

$$\sqrt{\frac{D_f}{vl}} < \frac{P_0}{2\sigma_m} \left(\frac{1}{1 + a_m} - \frac{M_c}{M_0}\right). \quad (22)$$

При выполнении неравенства (22) происходит разрыв, сопровождающийся внезапным выбросом. Если выполняется обратное неравенство, то разрыва пласта не происходит. Очевидно, что для выполнения неравенства (22) необходимо выполнение критерия Гриффитса

$$\frac{1}{1 + a_m} > \frac{M_c}{M_0}.$$

Выполнение критерия Гриффитса необходимо, но не достаточно для разрыва материала наполненной газом трещиной. Для того чтобы произошел разрыв, должно выполняться неравенство (22).

Критерий (22) справедлив для любых b при условии $D_e = D_f$. Если, например, $D_e \ll D_f$, т. е. фильтрация в окрестности трещины затруднена, то падение давления $p(\tau)$ внутри трещины происходит позднее, чем падение давления газа $p_e(\tau)$ в массиве, окружающем трещину. На рис. 3 видно, что при $\tau \approx 1$ штрихпунктирная линия расположена выше сплошной линии. Это означает, что при $D_e \ll D_f$ вероятность выброса значительно возрастает. В этом случае для определения степени опасности следует численно решать уравнение (19), а затем (21). Если на интервале $0 < \tau < 1$ решение (21) существует, то произойдет выброс, если решение отсутствует, то трещина лишь раскроется, но разрыва не произойдет.

Заключение. В работе исследовано влияние безразмерного параметра $b \equiv D_f/(vl)$ на эволюцию трещины. С использованием этого параметра сформулирован количественный критерий спонтанного разрушения краевого участка газонасыщенного пласта.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Алексеев А. Д.** Физика угля и горных процессов. Киев: Наук. думка, 2010.
2. **Фельдман Э. П., Калугина Н. А., Мельник Т. Н.** Роль разгрузки и фильтрации газа в процессе развития магистральных трещин в угольном пласте // ПМТФ. 2017. Т. 58, № 1. С. 177–188.
3. **Фельдман Э. П., Калугина Н. А., Чеснокова О. В.** Эволюция трещин в краевой части угольного пласта при его стационарной отработке // Mining Mineral Deposits. 2017. V. 11, N 2. P. 41–45.
4. **Fel'dman E. P., Vasilenko T. A., Kalugina N. A.** Physical kinetics of coal-methane system: mass transfer, pre-outburst events // J. Mining Sci. 2014. V. 50, N 3. P. 448–464.
5. **Zhi S., Elsworth D.** The role of gas desorption on gas outbursts in underground mining of coal // Geomech. Geophys. Geo-energy Geo-resources. 2016. V. 2. P. 151–171.
6. **Anderson T. Z.** Fracture mechanics. Fundamental and application. L.: CRC Press, 2005.
7. **Griffith A.** The phenomena of rupture and flow in solids // Philos. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A. 1921. V. 221, N 2. P. 163–198.
8. **Alexeev A. D., Feldman E. P., Vasilenko T. A.** Kinetics of methane desorption from coal nano- and meso-structures // Energy Fuels. 2010. V. 24. P. 4375–4379.
9. **Ржевский В. В.** Основы физики горных пород / В. В. Ржевский, Г. Я. Новик. М.: Недра, 1978.
10. **Алексеев А. Д.** Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений / А. Д. Алексеев, В. Н. Ревва, Н. А. Рязанцев. Киев: Наук. думка, 1989.
11. **Прудников А. П.** Интегралы и ряды / А. П. Прудников, Ю. А. Брычков, О. Н. Маричев. М.: Наука, 1981. Т. 1.

*Поступила в редакцию 2/VII 2018 г.,
после доработки — 26/IX 2018 г.
Принята к публикации 24/XII 2018 г.*