

ВЛИЯНИЕ ИСХОДНЫХ РАЗМЕРОВ ТРЕЩИН И НАЧАЛЬНОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ НА ВЫБРОСООПАСНОСТЬ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ БЫСТРОЙ ЕГО РАЗГРУЗКЕ

Л.И. Стефанович, Э.П. Фельдман, Н.А. Калугина, О.Ю. Мазур, О.В. Чеснокова, Институт физики горных процессов НАН Украины, Украина

Проанализировано влияние средних характерных размеров трещин и степени начальной трещиноватости на скорость её эволюции при быстрой разгрузке угольного пласта. Показано, что при вышеуказанных условиях средний характерный размер трещин нетронутого угольного пласта (в частности, их зияние) существенно влияет на темп развития трещиноватости, а начальная степень трещиноватости практически не сказывается на скорости эволюции трещиноватости. Вычислены характерные времена развития выброса для различных исходных значений трещиноватости и размеров трещин.

Как известно, в угольном пласте помимо пор и фильтрационных каналов всегда имеются трещины различной ориентации и размеров. До начала отработки, т.е. в нетронутом угольном пласте трещины не эволюционируют, поскольку они «задавлены» горным давлением. Последнее, как правило, в несколько раз превышает пластовое давление газа (давление газообразных флюидов, заполняющих внутренние пустоты угля). В процессе отработки угольного пласта происходит перераспределение напряжений, обусловленных горным давлением. В этом случае вертикальная составляющая напряжений превращается в опорное давление, которое является неоднородным вдоль пласта, достигая максимума на расстоянии порядка нескольких толщин пласта от груди забоя. Горизонтальная составляющая, поперечная по отношению к этой поверхности (напряжение бокового распора), обращается в нуль на этой поверхности, а по мере удаления от этой поверхности вглубь пласта она нарастает, достигая предельного значения, характерного для нетронутого пласта. Трещины, плоскость залегания которых параллельна поверхности забоя и находящиеся вблизи забоя, в той или иной мере освобождаются от сжимающих напряжений. Трещины горизонтального залегания, а также наклонные трещины практически не эволюционируют, поскольку по-прежнему «задавлены» горным давлением. Поэтому речь будет идти в основном об эволюции «поперечных» трещин. Сжимающие поперечные напряжения могут сниматься как внезапно, при отработке пласта взрывом, так и постепенно, при медленной отработке пласта с определенной скоростью подвигания забоя. Оба эти типа отработки индуцируют эволюцию краевых трещин за счет разрывного действия газа, находящегося в полости трещин. Очевидно, что для двух указанных видов отработки протекание процессов эволюции, трещин существенно различается.

Что касается эволюции отдельных магистральных трещин в газонасыщенном угольном пласте, то их эволюция подробно исследовалась как для случая быстрой разгрузки угольного пласта [1], так и при стационарном подвигании забоя [2, 3].

Однако для понимания общей картины развития выброса за счет резкого развития трещиноватости, когда коэффициент трещиноватости угля превышает критическую величину, этого оказывается недостаточно. В частности, остается нерешенным вопрос о влиянии исходной трещиноватости нетронутого угольного пласта, а также о роли начальных поперечных размеров (зияний) трещин на последующую эволюцию трещиноватости со временем.

Целью настоящей работы мы ставим проанализировать, как влияют на развитие выброса начальная трещиноватость газонасыщенного угольного пласта и средний характерный поперечный пространственный масштаб (зияние) трещин распределенных внутри угольного пласта.

При отработке угольного пласта, в особенности, при быстрой его разгрузке система газонасыщенный угольный пласт и насыщающие его флюиды оказывается в состоянии далеко от термодинамического равновесия. В результате воздействия на угольный пласт напряжений со стороны вмещающих горных пород с одной стороны, а с другой – пластового давления газов, насыщающих пустоты угольного пласта начинаются релаксационные

процессы, приводящие систему в состояние термодинамического равновесия. Одним из каналов релаксационных процессов газонасыщенного угольного пласта являются диффузионные и фильтрационные процессы, приводящие к медленному выделению газообразных флюидов. Другим же каналом релаксации накопленных напряжений является расширение его закрытых пустот (пор и, в особенности, трещин). При определенных условиях процесс эволюции трещин может быть достаточно медленным, в других же ситуациях он может происходить с нарастающей скоростью, что может приводить к катастрофическим последствиям (выбросам газугольной смеси). Для изучения этих процессов в общем случае следует записать систему эволюционных уравнений для газонасыщенного угольного пласта, содержащего поры и трещины.

При записи эволюционных уравнений возникает вопрос, какие именно величины выбрать в качестве параметров порядка. Если пренебречь изменениями пористости (т.е. положить, что коэффициент пористости $\gamma \neq \gamma(x,t) = const$), а также предположить, что число трещин фиксировано (т.е. трещины не залечиваются и не возникают вновь), т.е. среднее расстояние между трещинами не меняется ($r_c = const$), то в качестве несохраняющегося параметра порядка можно принять коэффициент трещиноватости: $\eta(\vec{r}, t)$, а в качестве сохраняющегося параметра порядка – давление газа (метана) в угольном пласте $P(\vec{r}, t)$. Кроме того, мы будем считать, что зияние трещин при эволюции угольного пласта меняется слабо, т.е. является в первом приближении постоянной величиной (т.е. $z_0 = const$), а все изменения объема трещин обусловлены в основном изменениями их длины L . Горное давление $P_m(\vec{r})$ будем считать известной функцией координат, но не зависящей от времени, а напряжение бокового распора будет считаться известной функцией координат и времени $\sigma_{\perp}(\vec{r}, t) \equiv \sigma_{\perp}(x, t)$.

Чтобы выяснить характер перераспределения давления метана и трещиноватости следует минимизировать термодинамический потенциал Гиббса. Последний, вообще говоря, является функционалом, который зависит не только от двух функций $\eta(\vec{r}, t)$ и $P(\vec{r}, t)$, но и от их градиентов $\nabla \eta(\vec{r}, t)$ и $\nabla P(\vec{r}, t)$. Но если предположить, что неоднородности функций $\eta(\vec{r}, t)$ и $P(\vec{r}, t)$ являются крупномасштабными, то слагаемыми с градиентами трещиноватости и давления можно пренебречь (так как они входят в функционал в квадратичном виде). Следовательно, функционал Гиббса будет зависеть только от функций η и P , а именно

$$\Phi\{\eta, P\} = \int_V \varphi(\eta, P) dV. \quad (1)$$

Кроме того, мы предполагаем, что отсутствуют как утечка газа из пласта, так и поступление газа в пласт. Следовательно, при минимизации функционала (1) необходимо учесть условие сохранения суммарного количества метана в пласте. Предполагается, кроме того, однородность температуры угля. В таком случае условие термодинамического равновесия пластового газа состоит в однородности его химического потенциала.

Если тем или иным способом перевести систему (угольный пласт) в неравновесные условия, например, за счет (быстрой или медленной) разгрузки угольного пласта, то следует полагать давление бокового распора функцией координат и времени $\sigma_{\perp}(x, t)$. Тогда в последующие моменты времени коэффициент трещиноватости угольного пласта и давление газа (метана) начнут эволюционировать. И эту эволюцию можно будет описать системой двух эволюционных уравнений, а именно, релаксационного уравнения Ландау-Халатникова для параметра $\eta(\vec{r}, t)$ и уравнения непрерывности (локального закона сохранения) для параметра $P(\vec{r}, t)$.

Таким образом, необходимо, прежде всего, записать входящий в (1) удельный термодинамический потенциал Гиббса газонасыщенного угольного пласта. Поскольку таковой был получен ранее в работе [4], но без учета упругой энергии, привносимой

трещинами, то следует к нему добавить слагаемые, обусловленные наличием в угольном пласте системы случайно распределенных трещин.

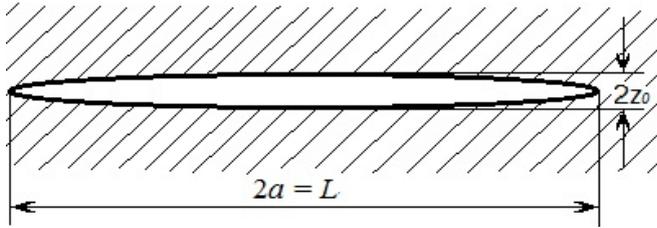


Рис. 1. Схематическое изображение трещины.

Следуя работам школы Христиановича, предположим, что в нетронутом угольном пласте трещина имеет форму сплюснутого эллипсоида вращения (сфероида) радиуса a и полярной полуосью z_0 (начальное полуэллипсоид трещины в нетронутом пласте). Предполагаем, что $z_0 \ll a$. В сечении трещина имеет вид (рис.1), где

L - полная длина трещины. Чтобы вычислить упругую энергию, которая выделяется при раскрытии подобной трещины, найдём работу растягивающего напряжения, приложенного к берегам трещины со стороны газообразных флюидов, заполняющих полость трещины. Она определяется соотношением

$$W_{1,cr} = A \approx -2\sigma S w, \quad (2)$$

Здесь $\sigma = P - \sigma_{\perp}$ - растягивающее напряжение, причем P - давление газов, заполняющих трещину, σ_{\perp} - напряжение бокового распора; w - полуоткрытие трещины. Следуя работе [5], полуоткрытие трещины можно представить в виде

$$w = \frac{2(1-\nu^2)}{\pi E} \sigma L, \quad (3)$$

где ν - коэффициент Пуассона, E - модуль Юнга угля.

Поскольку максимальная площадь сфероида равна $S = \pi L^2/4$, то выражение (2) принимает вид

$$W_{1,cr} = -\frac{(1-\nu^2)(P - \sigma_{\perp})^2 L^3}{E}. \quad (4)$$

Для того, чтобы трещина могла раскрыться должно выполняться условие $P > \sigma_{\perp}$. При образовании одной трещины длиной $2a = L$ вскрылись две новые поверхности, каждая площадью $\pi a^2 = \pi L^2/4$. Энергия, которая была затрачена на образование этих поверхностей, равна

$$W_{1,el}^s = 2S\sigma_s = \frac{1}{2}\pi\sigma_s L^2, \quad (5)$$

где σ_s - удельная поверхностная энергия. Таким образом, напряжение на берегах трещины вызывает изменение энергии деформированного угольного пласта на величину

$$W_{1,el} = W_{1,el}^s - W_{1,el}^v = \frac{1}{2}\pi\sigma_s L^2 - \frac{(1-\nu^2)(P - \sigma_{\perp})^2}{E} L^3, \quad (6)$$

Если предположить, что в процессе разгрузки угольного пласта число трещин остается неизменными ($N_{cr} = const$), а изменяется лишь их длина ($L \neq const$), то полная упругая энергия угольного пласта, содержащего N_{cr} , оказывается равной

$$W_{el} = W_{1,el} \cdot N_{cr}. \quad (7)$$

Тогда объёмная плотность упругой энергии в таком углепородном массиве получается делением выражения (10) на объём углепородного массива (угольной матрицы без трещин и пор), т.е.

$$w_{el} = \frac{W_{1,el}N_{cr}}{V - V_{cr} - V_p} = \frac{N_{cr}W_{1,cr}}{V(1-\eta-\gamma)} = \frac{W_{1,cr}}{r_c^3(1-\eta-\gamma)}. \quad (8)$$

Здесь $r_c = (V / N_{cr})^{1/3}$ - среднее расстояние между трещинами, $\eta = V_{cr}/V$ - коэффициент трещиноватости газонасыщенного угольного пласта, $\gamma = V_p/V$ - его коэффициент пористости.

Тогда с учетом (5), (6) и (8) окончательное выражение для плотности упругой энергии углеродного массива, содержащего N_{cr} трещин, принимает вид

$$w_{el}(L) = \frac{\pi\sigma_s L^2}{2r_c^3(1-\eta-\gamma)} - \frac{(1-\nu^2)(P-\sigma_\perp)^2 L^3}{r_c^3 E(1-\eta-\gamma)}. \quad (9)$$

Объем одной трещины в угольном пласте определяется выражением

$$V_{1,cr} = \frac{1}{3}\pi L^2 z_0. \quad (10)$$

Выразим плотность упругой энергии (9), обусловленной трещинами, через коэффициент трещиноватости η , который определяется соотношением

$$\eta = V_{cr}/V, \quad (11)$$

где V_{cr} - объем всех трещин, содержащихся в образце, V - объем образца. Выражение (11) можно переписать в виде

$$\eta = \frac{V_{1,cr}}{r_c^3} = \frac{\pi L^2 z_0}{3r_c^3}. \quad (12)$$

Тогда с учетом (12) выражение (9) принимает вид

$$w_{el}(\eta) = \frac{3\sigma_s}{2z_0(1-\eta-\gamma)}\eta - \frac{3\sqrt{3}(1-\nu^2)r_c^{3/2}(P-\sigma_\perp)^2}{(\pi z_0)^{3/2} E(1-\eta-\gamma)}\eta^{3/2}. \quad (13)$$

Воспользовавшись выражением для удельного термодинамического потенциала Гиббса, выведенным в работе [4] для газонасыщенного угольного пласта, содержащего только поры, и, добавив в него слагаемые (13), обусловленные трещинами, получаем выражение для локального термодинамического потенциала Гиббса вида

$$\begin{aligned} \varphi \approx & \frac{1}{2(1-\eta-\gamma)} \left[\frac{(P_m - \gamma P)^2}{K} + \frac{3\gamma(P_m - P)^2}{4G} \right] + \frac{3\sigma_s \eta}{2z_0(1-\eta-\gamma)} - \frac{3\sqrt{3}(1-\nu^2)r_c^{3/2}(P-\sigma_\perp)^2}{(\pi z_0)^{3/2} E(1-\eta-\gamma)} \eta^{3/2} + \\ & + (\gamma + \eta)P \ln(P/P_T). \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь P_m - горное давление, P - пластовое давление газообразного метана, содержащегося внутри пустот, K и G - модули всестороннего сжатия и сдвига соответственно. В выражении (14) величина P_T равна

$$P_T = T \left(\frac{mT}{2\pi h^2} \right)^{3/2} \left(\frac{T}{T_r} \right)^{3/2},$$

где m - масса молекулы метана, T - температура в энергетических единицах,

$$T_r = \left(\frac{18}{\pi} \right)^{1/3} \frac{h^2}{J}$$

- так называемая ротационная температура, J - момент инерции молекулы метана. При расчете P_T были приняты во внимание лишь поступательные и вращательные степени свободы молекулы метана (см., например [6])

Следует отметить, что в выражении (14) для удельного термодинамического потенциала Гиббса следовало бы учесть слагаемые, отвечающие энергии метана адсорбированного на внутренней поверхности трещин и пор и метана, находящегося в угольной матрице в виде

твердого раствора. Однако оценки показывают, что они дают малый вклад по сравнению со свободным метаном в трещинах и порах и мы ими пренебрегли.

Эволюцию коэффициента трещиноватости угольного пласта будем описывать с помощью известного релаксационного уравнения Ландау-Халатникова [7]

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\Gamma \frac{\partial \varphi(\eta, P)}{\partial \eta}. \quad (15)$$

Здесь Γ - некоторый кинетический коэффициент, который можно выразить через скорость распространения трещин v_{cr} и удельную поверхностную энергию σ_s следующим образом:

$$\Gamma : v_{cr} / \sigma_s.$$

Оценки показывают, что величина Γ изменяется в пределах $10^2 \div 10^3 \text{ м}^3 / (\text{Дж} \cdot \text{с})$.

Подставляя выражение (14) в (15), получаем уравнение Ландау-Халатникова в явном виде

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{t_{cr}} \left(\sqrt{\frac{\eta}{\eta_c(P)}} - 1 \right) - \Gamma P \ln(P/P_T). \quad (16)$$

Это – эволюционное уравнение для коэффициента трещиноватости, где введены следующие обозначения:

$$\sqrt{\eta_c(P)} = \frac{3\sigma_s E}{2z_0 A(P - \sigma_{\perp})^2}, \quad A = \frac{9\sqrt{3}(1 - \nu^2)(r_c/z_0)^{3/2}}{2\pi^{3/2}}; \quad t_{cr} = \frac{2z_0}{3v_{cr}}. \quad (17)$$

Здесь t_{cr} - характерное время распространения магистральной трещины, $\eta_c(P)$ - критическое значение коэффициента трещиноватости, зависящее, вообще говоря, от пластового давления газов внутри трещин P . Анализ правой части уравнения (16) показывает, что рост трещиноватости угольного пласта будет наблюдаться только в том случае, если начальное значение коэффициента трещиноватости $\eta_0 \equiv \eta(t)|_{t=0}$ превышает критическую величину $\eta_c(P)$.

Предварительные оценки показали, что при быстрой разгрузке угольного пласта фильтрационные процессы, связанные с выходом газообразных флюидов, не успевают происходить. Поэтому в уравнении (16) пластовое давление газа (метана) P можно считать постоянной величиной и уравнение фильтрационных процессов для функции P можно не рассматривать.

В случае быстрой разгрузки напряжение бокового распора можно приближенно положить равным

$$\sigma_{\perp}(t) \approx \sigma_m (1 - \theta(t)), \quad (18)$$

$$\theta(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } t \geq 0, \\ 0, & \text{при } t < 0. \end{cases} \quad (19)$$

В этом случае при решении уравнения (16) в (17) полагаем $\sigma_{\perp} = 0$. Для аналитического и численного решения уравнения (16) перепишем его в следующем, виде

$$\frac{d\eta}{d\tau} = \alpha \sqrt{\eta} - \beta - 1 \quad (20)$$

где введено безразмерное время $\tau = t/t_{cr}$ и следующие обозначения: $\alpha = [\eta_c(P)]^{1/2}$, $\beta = \Gamma t_{cr} P \ln(P/P_T)$. Асимптотический анализ решения уравнения (20) с начальным условием $\eta_0 > \eta_c(P)$ показывает, что на очень малых временах ($\tau \ll 1$) эволюция трещиноватости угольного пласта развивается по линейному закону

$$\eta(\tau) \approx \eta_0 \left(1 + \frac{\alpha \tau}{\sqrt{\eta_0}} \right). \quad (21)$$

Для получения более полной картины эволюции трещиноватости было проведено численное решение эволюционного уравнения (20) в размерном виде в программе MatLab для случая, когда исходный коэффициент трещиноватости превышает критическую величину, т.е. при $\eta_0 > \eta_c(P)$. В результате, получены три серии кривых. На рис. 2 приведены эволюционные кривые для коэффициента трещиноватости угольного пласта в случае, когда начальный коэффициент трещиноватости был на уровне 3%.

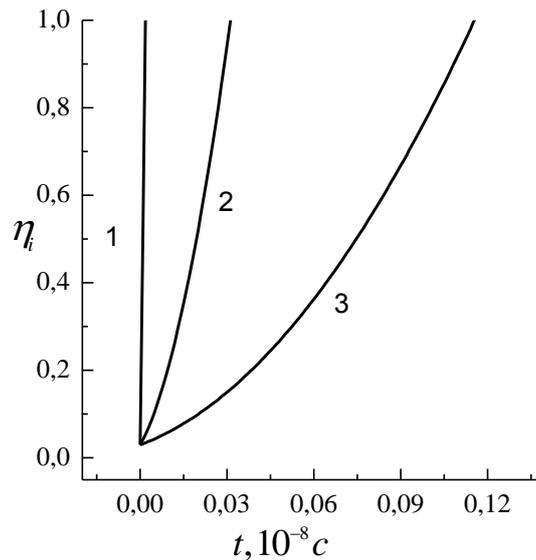


Рис. 2. Эволюция коэффициента трещиноватости для случая $\eta_0 = 0.03$. Кривые 1 – 3 отвечают исходным зияниям трещин z_{0i} равным $10^{-4} м$, $10^{-5} м$, $10^{-6} м$ соответственно.

На рис. 3 приведены эволюционные кривые для коэффициента трещиноватости угольного пласта в случае, когда начальный коэффициент трещиноватости был на уровне 4%.

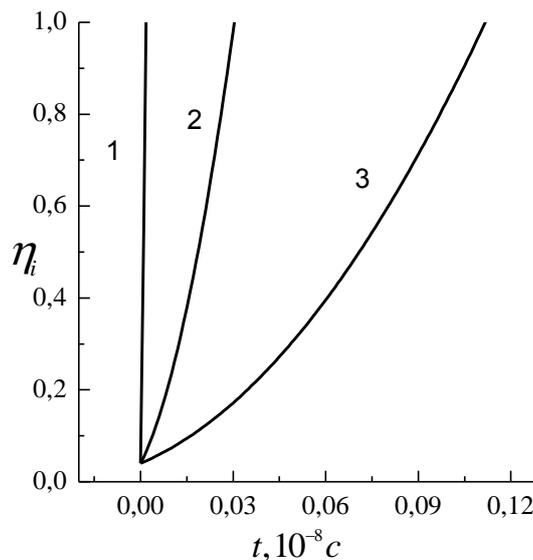


Рис. 3. Эволюция коэффициента трещиноватости для случая $\eta_0 = 0.04$. Кривые 1 – 3 отвечают исходным зияниям трещин z_{0i} равным $10^{-4} м$, $10^{-5} м$, $10^{-6} м$ соответственно.

И, наконец, на рис. 4 приведены эволюционные кривые для коэффициента трещиноватости угольного пласта в случае, когда начальный коэффициент трещиноватости был на уровне 5%.

На основе полученных кривых были рассчитаны времена полного разрушения угольного пласта за счет резкого развития трещиноватости, т.е. когда коэффициент трещиноватости в результате эволюции достигает значения равного единице ($\eta_i = 1$). Эти данные сведены в табл. 1.

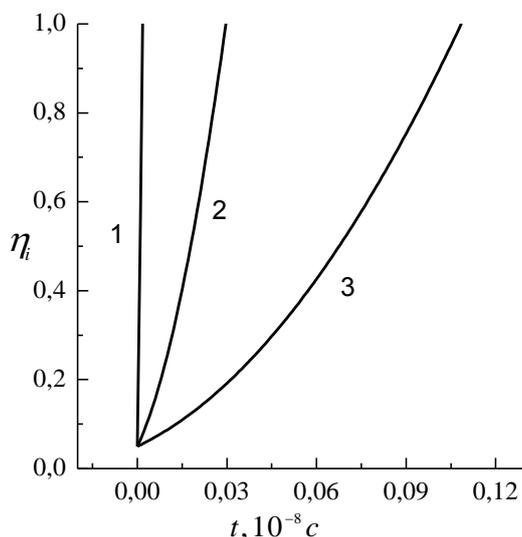


Рис. 4. Эволюция коэффициента трещиноватости для случая $\eta_0 = 0.05$. Кривые 1 – 3 отвечают исходным зияниям трещин z_{0i} равным 10^{-4} м, 10^{-5} м, 10^{-6} м соответственно.

Табл. 1

z_{0i} , м	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
0.03	$1.80 \cdot 10^{-11}$	$3.12 \cdot 10^{-10}$	$1.16 \cdot 10^{-9}$
0.04	$1.78 \cdot 10^{-11}$	$3.04 \cdot 10^{-10}$	$1.12 \cdot 10^{-9}$
0.05	$1.75 \cdot 10^{-11}$	$2.96 \cdot 10^{-10}$	$1.08 \cdot 10^{-9}$

Табл. 1. В первом столбце таблицы даны значения η_0 , в первой строке начальные зияния трещин z_{0i} . В столбцах 2 - 4 приведены времена (в секундах), когда достигаются значения $\eta_i = 1$, т.е. происходит полное разрушение угольного пласта.

Из этих рисунков и из таблицы времен следует, что исходная трещиноватость нетронутого угольного пласта влияет на развитие выброса незначительно, а вот начальный поперечный размер трещин (зияние) существенно влияет на темп развития трещиноватости, а именно, с уменьшением среднего зияния трещин нетронутого угольного пласта эволюция трещиноватости существенно замедляется. Причем в рассматриваемой ситуации, когда $\eta_0 > \eta_c(P)$ нарастание трещиноватости происходит очень резко (взрывным образом).

Выводы.

1. Из полученных эволюционных кривых (рис.1 – рис.3) для трещиноватости и таблицы характерных времен наступления выброса $t_i = t_i(z_{0i})$ следует, что при быстрой разгрузке

угольного пласта начальные значения трещиноватости слабо влияют на ее дальнейшую эволюцию со временем.

2. Средние же значения трещин нетронутого угольного пласта существенно влияют на дальнейшую эволюцию трещиноватости со временем. Анализируя графики кривых нарастания трещиноватости (рис.1 – рис.3), а также таблицу времен наступления выброса $t_i = t_i(z_{0i})$ можно заключить, что характерные времена развития выброса уменьшаются с ростом поперечных размеров трещин. Можно сказать, что в угольных пластах с трещинами большего значения разрушение угольного пласта наступает более быстро. При этом во всех случаях развитие трещиноватости происходит взрывным образом.

Таким образом, предварительное исследование трещиноватости угольного пласта и, в особенности, среднего характерного поперечного масштаба (значения) трещин позволяет предсказать, насколько быстро будет развиваться выброс при быстрой разгрузке угольного пласта.

Список литературы

1. Фельдман Э.П. Роль разгрузки и фильтрации газа в процессах развития магистральных трещин в угольном пласте / Э.П. Фельдман, Н.А. Калугина, Т.Н. Мельник // Журнал прикладной механики и технической физики. – 2017. Т. 58, №1. - С. 1 – 12.
2. Фельдман Э.П. Развитие магистральных трещин в газонасыщенном угольном пласте при стационарном подвигании забоя / Э.П. Фельдман, Н.А. Калугина // Физико-технические проблемы горного производства. – 2014. – Вып.17. - С. 46-52.
3. Фельдман Э. Эволюция трещин в краевой части угольного пласта при его стационарной отработке / Э. Фельдман, Н. Калугина, О. Чеснокова // Mining of Mineral Deposits. – 2017. Vol. 11. Issue 2. P. 41 – 45.
4. Алексеев А.Д. Термодинамика газоугольного массива и неоднородное распределение газов в угольных пластах // А.Д. Алексеев, Э.П. Фельдман, Н.А. Калугина // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80. Вып.12. - С. 57-60.
5. Р.Л. Салганик. Эффективная проводимость тела с большим числом трещин при учете их ёмкости и действия механических нагрузок // ИФЖ. - 1979. Т. 36, №6. - С. 1070 – 1076.
6. Ландау Л.Д. Статистическая физика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц Ч. 1. - М.: Наука, 1976. - 584 с.
7. Лифшиц Е.М. Физическая кинетика / Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. – М.: Наука, 1979. – 528 с.

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СПОСОБА ОХРАНЫ ВЫРАБОТКИ НА СОПРЯЖЕНИИ С ЛАВОЙ НА ШАХТЕ «ЮЖНОДОНБАССКАЯ №1»

*А.В. Солодянкин, С.В. Маишурка, И.В. Дудка, А.Е. Григорьев, О.А. Солодянкина,
Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Украина*

Для условий шахты «Южнодонбасская №1», выполнен комплекс численных исследований, разработана численная модель участка массива для обоснования параметров способа охраны выработки на сопряжении «лава-штрек», которая позволила изучить деформационные процессы, связанные с выемкой угля и работой элементов охранной системы, а также выбрать ее рациональные параметры для возможности повторного использования выработки.

Введение. С увеличением глубины разработки угольных месторождений существенно возрастают затраты на сооружение и поддержание протяженных выработок. Значительный