

УДК 622.831.242

Л.И. Стефанович, Э.П. Фельдман, О.Ю. Мазур

ЭВОЛЮЦИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ГАЗОНАСЫЩЕННОГО УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ БЫСТРОЙ ЕГО РАЗГРУЗКЕ

Институт физики горных процессов НАН Украины,
49600, г. Днепр ул. Симферопольская, 2-а.

Цель исследования. Проанализировать, как влияют на развитие выброса начальная трещиноватость газонасыщенного угольного пласта и средний характерный поперечный пространственный размер (зияние) трещин, распределенных внутри угольного пласта, при быстрой его разгрузке.

Методика исследования. Работа основана на теоретическом изучении, включая методы физической кинетики, а также содержит численный анализ эволюционных уравнений.

Результаты исследования. Обнаружено, что при быстрой разгрузке угольного пласта средний характерный размер трещин нетронутого угольного пласта (в частности, их зияние) существенно влияет на характер развития трещиноватости, а начальная степень трещиноватости практически не сказывается на скорости ее эволюции. Показано, что трещины с малым зиянием не склонны к развитию, а, начиная с некоторых критических значений зияний, трещиноватость угольного пласта развивается взрывным образом.

Научная новизна. Эволюция трещиноватости угольного пласта изучается на основе применения релаксационного уравнения Ландау-Халатникова для различных начальных условий.

Практическая значимость. Предварительное исследование характера трещиноватости угольного пласта и, в особенности, среднего характерного поперечного размера (зияния) трещин позволяет предсказать, насколько быстро будет развиваться выброс при быстрой разгрузке угольного пласта.

Ключевые слова: газонасыщенный угольный пласт, давление газообразных флюидов, напряжение бокового распора, коэффициент трещиноватости, быстрая разгрузка, выбросоопасность угольного пласта.

Введение

При отработке газонасыщенных угольных пластов особое место занимает проблема внезапных выбросов угля, породы и газа. Она приобретает особую

актуальность с точки зрения обеспечения безопасной работы горняков. Несмотря на многофакторный характер данной проблемы, анализ и обработка статистических данных по выбросам [1, 2] позволяют выделить наиболее важные факторы, влияющие на подготовку и развитие внезапного выброса.

Известно, что в угольных пластах 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. Вертикальная составляющая напряжений в этом случае 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, освобождаются от сжимающих напряжений тем больше, чем ближе они находятся вблизи края угольного пласта. Трещины горизонтального залегания, а также наклонные трещины практически не эволюционируют, поскольку по-прежнему «задавлены» горным давлением. Здесь речь будет идти в основном об эволюции вертикальных («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 инициируют 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 [3], так и при стационарном подвигании забоя [4, 5].

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 (зигний) трещин на последующую эволюцию трещиноватости со временем. Поэтому в настоящей работе ставится задача проанализировать, как влияют на развитие выброса начальная трещиноватость газонасыщенного угольного

пласта и средний характерный поперечный пространственный масштаб (зияние) трещин, случайно распределенных внутри угольного пласта.

Методики

При отработке угольного пласта, а в особенности, при быстрой его разгрузке система газонасыщенный угольный пласт и насыщающие его газообразные флюиды оказывается в состоянии, далеком 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, стремящиеся привести систему в состояние термодинамического равновесия. Одним из каналов релаксации газонасыщенного угольного пласта являются диффузионные и фильтрационные процессы, приводящие к медленному выделению газообразных флюидов в отработанное пространство забоя. 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). На практике важно определить условия, при которых это будет происходить. Для изучения этих процессов в общем случае следует записать систему эволюционных уравнений для газонасыщенного угольного пласта, содержащего поры и трещины.

Чтобы записать эволюционные уравнения мы должны сделать ряд предположений относительно выбора параметров порядка. Если пренебречь изменениями пористости, т.е. предположить, что коэффициент пористости есть постоянная величина ($\gamma \neq \gamma(x, t) = const$), 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 взять коэффициент трещиноватости: $\eta(\vec{r}, t)$, а в качестве сохраняющегося параметра порядка – давление газа (метана) в угольном пласте $P(\vec{r}, t)$. Кроме того, предположим, что зияние трещин при эволюции угольного пласта меняется слабо, т.е. является в первом приближении постоянной величиной (т.е. $z_0 \approx const$), а все изменения объема трещин в основном обусловлены 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

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

Мы строим теорию в предположении, что отсутствуют как утечка газа из пласта, так и поступление газа в пласт. Следовательно, при минимизации функционала (1) используется условие сохранения суммарного количества метана в пласте. Кроме того, предполагается, что температура угля вдоль пласта является однородной. В таком случае условие термодинамического равновесия рассматриваемой системы сводится к пространственной однородности его химического потенциала.

В реальных условиях забоя за счет (быстрой или медленной) разгрузки угольный пласт оказывается в термодинамически неравновесных условиях. В нашей модели это осуществляется путем задания напряжения бокового распора специальной функцией координат и времени $\sigma_{\perp}(x, t)$. Последующую релаксацию такой неравновесной системы можно, например, проследить, изучая эволюцию коэффициента трещиноватости угольного пласта и давления газа (метана). Математически эту эволюцию можно будет описать системой двух эволюционных уравнений, а именно, релаксационного уравнения Ландау-Халатникова для коэффициента трещиноватости $\eta(\vec{r}, t)$, а также уравнения непрерывности (локального закона сохранения) для параметра $P(\vec{r}, t)$.

Запишем, прежде всего, 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.

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

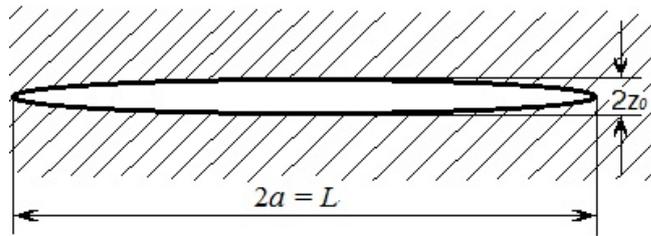


Рис. 1. Схематическое изображение трещины.

Чтобы вычислить упругую энергию, которая выделяется при раскрытии подобной трещины, вычислим 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 $2a = L$ образуются две новые поверхности, каждая площадью $\pi a^2 = \pi L^2/4$. Энергия, которая была затрачена на образование этих поверхностей

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

где σ_s - удельная поверхностная энергия. Таким образом, напряжение на берегах изолированной трещины, находящейся на расстоянии x от груди забоя,

вызывает изменение энергии деформированного угольного пласта на величину

$$W_{el}^{(0)}(x) = W_{s,el}^{(0)} - W_{v,el}^{(0)} = \frac{1}{2} \pi \sigma_s L^2 - \frac{(1-\nu^2)(P - \sigma_{\perp}(x))^2}{E} L^3. \quad (6)$$

Предполагается, что зависимость «поперечных» напряжений от координаты x , отсчитываемой от забоя внутрь пласта по его простирацию, изменяется по линейному закону

$$\sigma_{\perp}(x) = -\sigma_m \frac{x}{l}, \quad \text{если } 0 < x < l; \quad (7)$$

$$\sigma_{\perp}(x) = -\sigma_m, \quad \text{если } x > l. \quad (7-a)$$

Здесь l можно считать размером зоны разгрузки, σ_m - «поперечные» напряжения (напряжения бокового распора) в нетронутом угольном пласте. По порядку величины они равны половине горного давления (т.е. $\sigma_m = 0.5 P_m$). Знак “-” в (7-а) означает сжатие.

Чтобы рассчитать полную энергию деформации, обусловленную трещинами, содержащимися в той части угольного пласта, которая подверглась разгрузке, заметим, что в ненарушенном угольном пласте напряжение T , действующее на берегах трещины, состоит из двух слагаемых: сжимающего напряжения σ_{\perp} (напряжение бокового распора) и внутрипластового давления газа P_0 , т.е. $T = \sigma_{\perp} + P_0 = P_0 - |\sigma_{\perp}|$. (так как $\sigma_m < 0$).

Поскольку мы рассматриваем эволюцию вертикальных («поперечных») трещин, среднее расстояние между которыми равно r_c , то трещины будут располагаться от поверхности забоя на дискретных расстояниях $x_i = i r_c$, где i - номер трещины, отсчитываемый от поверхности забоя вглубь угольного пласта.

Чтобы рассчитать число трещин N_{cr} , попадающих в зону разгрузки, воспользуемся условием, что состояние механического равновесия для трещин реализуется в тот момент, когда величина поперечного механического напряжения $|\sigma_{\perp}|$ в процессе разгрузки угольного пласта сравнивается с внутрипластовым давлением газа P_0 . Тогда, используя выражение (7), получаем уравнение для нахождения N_{cr}

$$\left(P_0 - \frac{P_m r_c}{2l} i \right) = 0. \quad (8)$$

Откуда находим число трещин N_{cr} , попадающих в зону разгрузки

$$N_{cr} = 2 \frac{P_0 l}{P_m r_c}. \quad (9)$$

Чтобы найти полную энергию деформации, создаваемую этими трещинами, необходимо просуммировать выражение (6) числу трещин в зоне разгрузки, т.е. по i в пределах от 1 до N_{cr} . Тогда с учетом (7) получаем

$$W = W_s^{(0)} N_{cr} - \frac{(1-\nu^2)L^3}{E} \sum_{i=1}^{N_{cr}} \left(P_0 - \frac{P_m r_c}{2l} i \right)^2. \quad (10)$$

Полагая в выражении (9) $l = 5\text{ м}$, $r_c = 10^{-2}\text{ м}$, $P_m = 25\text{ МПа}$, $P_0 = 5\text{ МПа}$, считаем число трещин в зоне разгрузки, N_{cr} , которое оказывается равным $N_{cr} = 200$. Таким образом, сумма, входящая в выражение (10), дает значение

$$\sum_{i=1}^{N_{cr}} \left(P_0 - \frac{P_m r_c}{2l} i \right)^2 = P_0^2 \sum_{i=1}^{N_{cr}} (1 - ki)^2 = P_0^2 \sum_{i=1}^{200} (1 - 0.005 \cdot i)^2 = 66.1675 P_0^2 \approx \frac{1}{3} P_0^2 N_{cr}. \quad (11)$$

Следовательно, с учетом (11) выражение (10) для полной энергии упругой деформации в зоне разгрузки принимает вид

$$W = W_s^{(0)} N_{cr} - \frac{1}{3} W_v^{(0)} N_{cr}, \quad (12)$$

где $W_s^{(0)}$ и $W_v^{(0)}$ поверхностная и объемная энергии деформации, создаваемые одиночной трещиной, которые соответственно определяются выражениями

$$W_s^{(0)} = \frac{1}{2} \pi \gamma_s L^2; \quad W_v^{(0)} = \frac{(1-\nu^2) P^2 L^3}{E}. \quad (13)$$

Здесь сделано предположение, что в зоне разгрузки угольного пласта число трещин остается неизменными ($N_{cr} = const$), а изменяется лишь их длина ($L \neq const$).

Тогда объемная плотность упругой энергии в таком углепородном массиве получается делением выражения (12) на объем углепородного массива (угольной матрицы без трещин и пор), т.е.

$$w_{el} = \frac{W_s^{(0)} N_{cr} - (1/3) W_v^{(0)} N_{cr}}{V - V_{cr} - V_p} = \frac{N_{cr} (W_s^{(0)} - (1/3) W_v^{(0)})}{V(1 - \eta - \gamma)} = \frac{W_s^{(0)} - (1/3) W_v^{(0)}}{r_c^3 (1 - \eta - \gamma)}. \quad (14)$$

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

Тогда с учетом (12), (13) и (14) окончательное выражение для плотности упругой энергии углепородного массива, содержащего трещин, принимает вид

$$w_{el}(L) = \frac{\pi \sigma_s L^2}{2r_c^3(1-\eta-\gamma)} - \frac{(1-\nu^2)(P-\sigma_{\perp})^2 L^3}{3r_c^3 E(1-\eta-\gamma)}. \quad (15)$$

Поскольку мы предположили, что трещина имеет форму сфероида, то объем одной трещины в угольном пласте определяется соотношением

$$V_{1,cr} = \frac{1}{3} \pi L^2 z_0. \quad (16)$$

Выразим плотность упругой энергии (15), обусловленной трещинами, через коэффициент трещиноватости η , который определяется соотношением

$$\eta = V_{cr} / V, \quad (17)$$

где V_{cr} - объем всех трещин, содержащихся в образце, V - объем образца. Выражение (17) можно переписать в виде

$$\eta = \frac{V_{1,cr}}{r_c^3} = \frac{\pi L^2 z_0}{3r_c^3}. \quad (18)$$

Тогда с учетом (18) выражение (15) принимает вид

$$w_{el}(\eta) = \frac{3\sigma_s}{2z_0(1-\eta-\gamma)} \eta - \frac{\sqrt{3}(1-\nu^2)(r_c/z_0)^{3/2} (P-\sigma_{\perp})^2}{\pi^{3/2} E(1-\eta-\gamma)} \eta^{3/2}. \quad (19)$$

Воспользовавшись выражением для удельного термодинамического потенциала Гиббса, выведенным в работе [4] для газонасыщенного угольного пласта, содержащего только поры, и, добавив в него слагаемые (19), обусловленные упругой энергией трещин, получаем выражение для плотности локального термодинамического потенциала Гиббса вида

$$\varphi \approx \frac{1}{2(1-\eta-\gamma)} \left[\frac{(P_m - \gamma P)^2}{K} + \frac{3\gamma(P_m - P)^2}{4G} \right] + \frac{3\sigma_s \eta}{2z_0(1-\eta-\gamma)} - \frac{\sqrt{3}(1-\nu^2)(r_c/z_0)^{3/2} (P - \sigma_\perp)^2}{\pi^{3/2} E(1-\eta-\gamma)} \eta^{3/2} + (\gamma + \eta) P \ln(P/P_T). \quad (20)$$

Здесь P_m - горное давление, P - пластовое давление газообразного метана, содержащегося внутри пустот, K и G - модули всестороннего сжатия и сдвига соответственно. В выражении (20) величина P_T равна

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

где m - масса молекулы метана, T - температура в энергетических единицах, $T_r = (18/\pi)^{1/3} (\hbar^2/J)$ - 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 (20) 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 пренебрегаем.

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

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\Gamma \frac{\partial \varphi(\eta, P)}{\partial \eta}. \quad (21)$$

Здесь Γ - некоторый кинетический коэффициент, который можно оценить отношением скорости распространения трещин v_{cr} к удельной поверхностной энергии σ_s следующим образом: $\Gamma \sim v_{cr}/\sigma_s$. В углях эта величина Γ изменяется в пределах $10^{-2} \div 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{Дж} \cdot \text{с})$.

Подстановка выражения (20) в (21) дает возможность представить уравнение Ландау-Халатникова в явном виде

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{t_{cr}} \left(\sqrt{\frac{\eta}{\eta_c(P)}} - 1 \right) - \Gamma P \ln(P/P_T). \quad (22)$$

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

$$\sqrt{\eta_c(P)} = \frac{3\sigma_s E}{2z_0 A(P - \sigma_{\perp}(x))^2}, A = \frac{3\sqrt{3}(1 - \nu^2)(r_c/z_0)^{3/2}}{2\pi^{3/2}}; t_{cr} = \frac{2z_0}{3\nu_{cr}}. \quad (23)$$

Здесь t_{cr} - характерное время распространения магистральной трещины, $\eta_c(P)$ - критическое значение коэффициента трещиноватости, зависящее как от пластового давления газов внутри трещин P , так и от напряжения бокового распора σ_{\perp} . Анализ правой части уравнения (22) 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 $\eta_c(P)$. Заметим, что, согласно (7), и первому из выражений (23) критический коэффициент трещиноватости оказывается, вообще говоря, функцией координаты x . Однако, в случае быстрой разгрузки угольного пласта, например, взрывом, основную решающую роль для выбороопасности угольного пласта играют краевые трещины угольного пласта. Поэтому координатной зависимостью в функции критической трещиноватости (23) можно пренебречь. Что же касается временной зависимости напряжения бокового распора, то, с учетом сказанного выше, её можно приближенно описать функцией

$$\sigma_{\perp}(t) \approx \sigma_m(1 - \theta(t)), \quad (24)$$

$$\theta(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } t \geq 0, \\ 0, & \text{при } t < 0. \end{cases} \quad (25)$$

В этом случае в (23) просто полагаем $\sigma_{\perp} = 0$.

Заметим, что в работе [8] нами не было учтено, что с ростом трещиноватости, т.е. при увеличении объема трещин давление газообразных флюидов внутри них снижается. Поэтому на самом деле в процессе эволюции трещин критический коэффициент трещиноватости не является фиксированной величиной, а оказывается функцией пластового давления P , а именно:

$$\sqrt{\eta_c(P)} = \frac{3\sigma_s E}{2z_0 A} \cdot \frac{1}{P^2(t)}. \quad (26)$$

Поскольку давление газов внутри трещин зависит от времени через коэффициент трещиноватости, то в выражение (23) необходимо подставить зависимость давления метана внутри трещины от времени. Эту зависимость

можно найти из уравнения состояния с учетом адиабатического характера расширения газа внутри трещины

$$P_0 V_0^\kappa = P(t) V^\kappa(t). \quad (27)$$

Откуда следует

$$P(t) = \frac{V_0^\kappa}{V^\kappa(t)} P_0, \quad (28)$$

где κ - показатель адиабаты (в случае метана $\kappa = 4/3$), P_0 - внутрипластовое давление метана в нетронутом угольном пласте. При снятии нагрузки с угольного пласта, трещины всегда увеличивают свой объем, т. е. $V(t) > V_0$, а, следовательно, $P(t) < P_0$ всегда.

Поскольку мы предположили, что зияние трещин $z_0 \approx const$, то в соответствии с (16) для текущего объема трещины получаем выражение

$$V(t) = \frac{4}{3} \pi a^2(t) z_0 = \frac{\pi}{3} L^2(t) z_0. \quad (29)$$

Как было показано ранее, длина трещины L и коэффициент трещиноватости η связаны соотношением (18). С учетом этого выражение (21) можно представить в виде

$$V(t) = r_c^3 \eta. \quad (30)$$

Полученное выражение (22) подставляем в (20), находим окончательно зависимость пластового давления метана в трещинах от коэффициента трещиноватости, а именно

$$P(\eta) = \left(\frac{\pi L_0^2 z_0}{3} \right)^\kappa \frac{P_0}{r_c^{3\kappa} \eta^\kappa} \sim \frac{1}{\eta^\kappa} \sim \eta^{-4/3}. \quad (31)$$

Подставляя выражение (31) в первое из соотношений (23), находим окончательно зависимость критического коэффициента трещиноватости от текущего его значения, т.е. $\eta_c = \eta_c(\eta)$:

$$\sqrt{\eta_c(\eta)} = \frac{3\sigma_s E r_c^8}{2z_0 A P_0^2 V_0^{8/3}} \eta^{8/3}. \quad (32)$$

Тогда с учётом (28), (32) эволюционное уравнение приобретает вид

$$\frac{d\eta}{dt} = \gamma \left[\left(\alpha / \eta^{13/6} \right) - 1 \right] + \left(\beta / \eta^{4/3} \right) \left(\frac{4}{3} \ln \eta - \ln \delta \right), \quad (33)$$

Рассмотрим ситуацию, когда зияние трещин z_{0i} пробегает следующие значения:

$$z_{01} = 10^{-3} \text{ м}; z_{02} = 10^{-4} \text{ м}; z_{03} = 10^{-5} \text{ м}, \quad (34)$$

Тогда для численного расчета мы получаем из уравнения (33) совокупность 3-х уравнений, нумеруемых индексами $i=1, 2, 3$.

$$\frac{d\eta_i}{dt} = \gamma_i \left[\left(\alpha_i / \eta_i^{13/6} \right) - 1 \right] + \left(\beta_i / \eta_i^{4/3} \right) \left(\frac{4}{3} \ln \eta_i - \ln \delta_i \right), \quad (35)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\gamma_i = 1/t_{cr}^{(i)}; \alpha_i = \frac{2P_0^2 z_{0i} A_i V_{0i}^{8/3}}{3\sigma_s E r_c^8}; \beta_i = \frac{\Gamma P_0 V_{0i}^{4/3}}{r_c^4}; \delta_i = \frac{P_0 V_{0i}^{4/3}}{P_T r_c^4}. \quad (36)$$

Для оценки параметров, входящих в выражения (23), а также коэффициентов (36) уравнения (35) воспользуемся следующими характерными для угля значениями величин:

$$\begin{aligned} v_{cr} &\sim (1/60) \text{ м/с}; P/P_T \sim 10^5; L_0 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\ \sigma_s &= 10 \text{ Дж/м}^2; E = 2.5 \cdot 10^9 \text{ Па}. \end{aligned} \quad (37)$$

Значения коэффициентов (36) уравнения (35) рассчитанные с учетом (37) приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Числовые значения коэффициентов эволюционного уравнения (35)

$z_{0i}, \text{ м}$	$\gamma_i, \text{ с}^{-1}$	α_i	β_i	δ_i
10^{-3}	25	$3,55 \cdot 10^{-5}$	9,95	$1,99 \cdot 10^{-8}$
10^{-4}	$2,5 \cdot 10^2$	$2,41 \cdot 10^{-7}$	0,46	$9,23 \cdot 10^{-10}$
10^{-5}	$2,5 \cdot 10^3$	$1,63 \cdot 10^{-9}$	$2,14 \cdot 10^{-2}$	$4,29 \cdot 10^{-11}$

Предварительные оценки показали, что при быстрой разгрузке угольного пласта фильтрационные процессы, связанные с выходом газообразных флюидов, не успевают происходить. Поэтому уравнение фильтрационных процессов для функции P , которая описывает пластовое давление газа, можно не рассматривать.

Для получения полной картины эволюции трещиноватости в угольном пласте в случае его внезапной разгрузки было проведено численное решение эволюционного уравнения (35) в размерном виде в программе MatLab для различных начальных значений коэффициента трещиноватости при различных средних значениях зияний трещин (34) нетронутого угольного пласта. В результате, получены три серии кривых, описывающих эволюцию трещиноватости угольного пласта при различных исходных значениях его трещиноватости.

Результаты

На рис. 2 приведены эволюционные кривые для коэффициента трещиноватости угольного пласта в случае, когда начальная трещиноватость угольного пласта сравнительно невелика, т.е. начальный коэффициент трещиноватости η_0 составляет 1%.

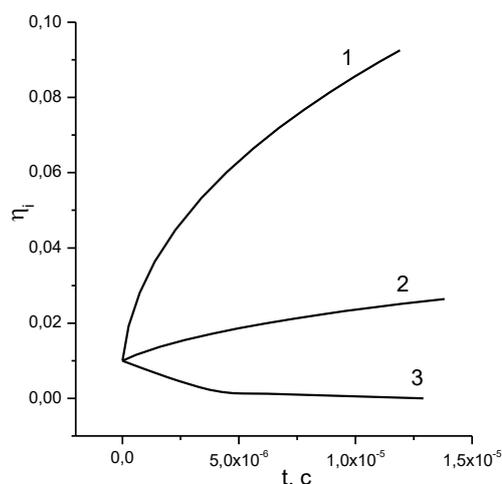


Рис. 2. Эволюция коэффициента трещиноватости для случая $\eta_0 = 0,01$. Кривые 1 – 3 отвечают исходным зияниям трещин z_{0i} равным $10^{-3} м$, $10^{-4} м$, $10^{-5} м$ соответственно

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

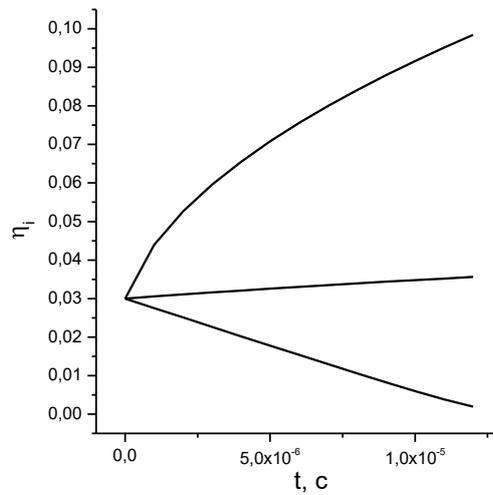


Рис. 3. Эволюция коэффициента трещиноватости для случая $\eta_0 = 0,03$. Кривые 1 – 3 отвечают исходным значениям трещин z_{0i} равным $10^{-3} м$, $10^{-4} м$, $10^{-5} м$ соответственно.

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

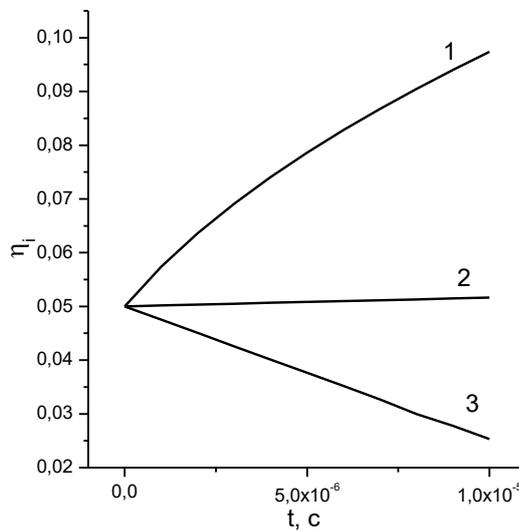


Рис. 4. Эволюция коэффициента трещиноватости для случая $\eta_0 = 0,05$. Кривые 1 – 3 отвечают исходным значениям трещин z_{0i} равным $10^{-3} м$, $10^{-4} м$, $10^{-5} м$ соответственно.

Обсуждение

Анализ кривых на рис. 2 показывает, что в зависимости от характерного исходного зияния трещин эволюция трещиноватости существенно различается. А именно, в случае малых исходных поперечных размеров трещин ($z_0 \sim 10^{-5} \text{ м}$) они не увеличивают свой размер, т.е. трещиноватость подавляется горным давлением. Если же характерные исходные поперечные размеры трещин на уровне ($z_0 \sim 10^{-4} \text{ м}$), то трещиноватость немного возрастает, но выходит на насыщение при сравнительно незначительных значениях коэффициента трещиноватости $\eta < 0,1$. И, наконец, для трещин сравнительно больших исходных поперечных размеров ($z_0 \sim 10^{-5} \text{ м}$) наблюдается резкий рост трещиноватости со временем, что свидетельствует о разрушении угольного пласта, т.е. угрожает развитием выброса.

Анализ кривых, представленных на рис. 3 показывает, что несмотря на большее значение исходной трещиноватости ситуация с развитием трещиноватости аналогична той, что наблюдалась на рис. 2.

Несмотря на то, что на рис. 4 рассмотрен случай большой начальной трещиноватости угольного пласта ($\eta_0 = 0,05$), эволюция трещиноватости со временем развивается аналогичным образом, как и на рис. 2 и рис. 3.

На основе полученных кривых можно оценить времена полного разрушения угольного пласта за счет резкого развития трещиноватости, т.е. когда коэффициент трещиноватости в результате эволюции достигает значения равного единице. При этом оказывается, что времена разрушения трещин ближайших к краю угольного пласта составляют доли секунды.

Полученные нами результаты свидетельствуют, что исходная трещиноватость нетронутого угольного пласта влияет на развитие выброса незначительно. Что же касается начального поперечного размера трещин (зияния), то эта характеристика трещин существенно влияет на процесс развития трещиноватости, а именно, с уменьшением среднего зияния трещин нетронутого угольного пласта эволюция трещиноватости существенно замедляется, а то и прекращается вовсе. Физика этого явления, на наш взгляд, такова. Чем меньше зияние трещин, тем больше площадь соприкосновения берегов трещин, особенно в их устье. А, следовательно, при одном и том же модуле сцепления нужно приложить тем большее усилие (или большую энергию), чтобы разорвать трещину, чем меньше её зияние. Здесь также может сказываться большой объем газа (метана), содержащийся в трещинах большего размера в нетронутом угольном пласте под давлением P_0 , который распирает трещины после быстрой разгрузки угольного пласта.

Выводы

1. Из полученных эволюционных кривых (рис. 2 – рис. 4) для трещиноватости 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. 2 – рис. 4), можно заключить, что характерные времена развития выброса с ростом поперечных размеров трещин уменьшаются.

При малых поперечных размерах трещин, т.е. при $z_0 < 10^{-4}$ м, рост трещиноватости не наблюдается. Можно сказать, что наиболее вероятным является разрушение газонасыщенных угольных пластов, содержащих трещины большего зияния.

Таким образом, предварительное исследование характера трещиноватости угольного пласта и, в особенности, среднего характерного поперечного масштаба (зияния) трещин позволяет предсказать, насколько выбросоопасным является газонасыщенный угольный пласт при быстрой его разгрузке.

1. Anderson T.L. Fracture Mechanics. Fundamental and Applications, CRC Press, London, (1995).
2. Alexeev A.D. Physics of Coal and Mining Processes, CRC Press, London, (2012).
3. Feldman E.P. Rol' razgruzki i fil'tratsii gaza v protsesakh razvitiya magistral'nykh treshchin v ugol'nom plaste / E.P. Feldman, N.A. Kalugina, T.N. Mel'nik // Zhurnal prikladnoj mekhaniki i tekhnicheskoy fiziki. – 2017. V. 58, No.1. - P. 1 – 12 (in Russian).
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Салганик Р.Л. Эффективная проводимость тела с большим числом трещин при учете их ёмкости и действия механических нагрузок // ИФЖ. - 1979. Т. 36, №6. - С. 1070 – 1076.
8. Ландау Л.Д. Статистическая физика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц Ч. 1. - М.: Наука, 1976. – 584 с.
9. Лифшиц Е.М. Физическая кинетика / Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. – М.: Наука, 1979. – 528 с.

10. Стефанович Л.И., Фельдман Э.П., Калугина Н.А., Мазур О.Ю., Чеснокова О.В. Влияние исходных размеров трещин и начальной трещиноватости на выбороопасность угольного пласта при быстрой его разгрузке. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Форум гірників», Дніпро, 10-13 жовтня 2018 р. С. 108-115.

Л.И. Стефанович, Е.П. Фельдман, О.Ю. Мазур

ЕВОЛЮЦІЯ ТРІЩИНУВАТОСТІ ГАЗОНАСИЧЕНОГО ВУГІЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ ШВИДКОМУ ЙОГО РОЗВАНТАЖЕННІ

Мета дослідження. Проаналізувати, як впливають на розвиток викиду початкова тріщинуватість газонасиченого вугільного пласта та середній характерний поперечний просторовий розмір (з'являння) тріщин, розподілених всередині вугільного пласта, при швидкому його розвантаженні.

Методика дослідження. Робота базується на теоретичному вивченні, включаючи методи фізичної кінетики, а також містить чисельний аналіз еволюційних рівнянь.

Результати дослідження. Виявлено, що при швидкому розвантаженні вугільного пласта середній характерний розмір тріщин незайманого вугільного пласта (зокрема, їх з'являння) істотно впливає на характер розвитку тріщинуватості, а початкова ступінь тріщинуватості практично не позначається на швидкості її еволюції. Показано, що тріщини з малим з'являнням, не схильні до розвитку, а починаючи з деяких критичних значень з'являнь тріщин тріщинуватість вугільного пласта розвивається вибуховим чином.

Наукова новизна. Еволюція тріщинуватості вугільного пласта вивчається на основі застосування релаксаційного рівняння Ландау-Халатнікова для різних початкових умов.

Практична значимість. Попереднє дослідження характеру тріщинуватості вугільного пласта і, особливо, середнього характерного поперечного розміру (з'являння) тріщин дозволяє передбачити, наскільки швидко буде розвиватися викид при швидкому розвантаженні вугільного пласта.

Ключові слова: газонасичений вугільний пласт, тиск газоподібних флюїдів, напруга бічного розпору, коефіцієнт тріщинуватості, швидке розвантаження, викидонебезпе́чність вугільного пласта.

L.I. Stefanovich, E.P. Feldman, O.Yu. Mazur

EVOLUTION OF THE CRACKS OF THE GAS-SATURATED COAL LAYER DURING FAST ITS UNLOADING

In this paper, the aim is to analyze how the initial fracturing of a gas-saturated coal seam and the average characteristic transverse size (gaping) of cracks distributed inside the coal seam, with its rapid unloading, will influence the development of the release. The system coal seam and gaseous fluids saturating it as a result of rapid unloading is in a state far from the state of thermodynamic equilibrium. To describe the relaxation of such a system to the

state of thermodynamic equilibrium, the Landau – Khalatnikov relaxation equation is applied. The evolutionary equation for the fracturing coefficient of a coal seam is derived under the assumption that the filtration processes of methane from the coal seam can be neglected. The evolution of coal seam fracturing is studied taking into account changes in the pressure of gaseous fluids inside the fractures. The evolutionary equation is numerically solved for different values of the initial fracturing coefficient of the coal seam and for different initial values of the transverse dimensions of cracks randomly distributed in the coal seam. Evolutionary curves describing the development of coal seam fracturing coefficient are obtained. It was found that during the rapid unloading of a coal seam, the average characteristic transverse size of the cracks of an untouched coal seam (in particular, their gaping) significantly affects the nature of fracture development, and the initial degree of fracture hardly affects the rate of its evolution. It is shown that cracks with a small gap are not prone to development, and, starting with some critical values of the gapes, the fracturing of the coal seam develops in an explosive manner. Therefore, a preliminary study of the nature of the fracturing of the coal seam and, in particular, of the average characteristic transverse size (gaping) of the cracks, makes it possible to predict how quickly the ejection will develop when the coal seam is quickly unloaded.

Keywords: gas-saturated coal seam, pressure of gaseous fluids, lateral thrust stress, fracture coefficient, rapid unloading, outburst hazard of coal seam.