

УДК 622.833.5

В.Г. Смирнов, В.В. Дырдин, С.А. Шепелева

ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ, СКЛОННЫХ К ВНЕЗАПНЫМ ВЫБРОСАМ УГЛЯ И ГАЗА

Механизм развязывания внезапных выбросов угля и газа исследуется на протяжении практически всей истории горного дела.

В последние десятилетия разработаны методики по прогнозированию и предотвращению внезапных выбросов [1], применение которых существенно снижает вероятность внезапных выбросов. Теоретически и экспериментально исследованы отдельные этапы развития внезапного выброса [2].

Однако и в настоящее время отдельные детали внезапного выброса раскрыты не полностью. Нет полной ясности в причинах лавинообразного разложения твердого углегазового раствора [3], недостаточно исследованы вопросы «спускового» механизма внезапного выброса, нет четкого представления о напряженном и газовом состоянии окрестности точки, в которой «начинается» внезапный выброс.

Целостное описание явления позволит точнее предсказывать и предотвращать внезапные выбросы, что особенно актуально при увеличении глубины ведения горных работ и вовлечении в промышленную разработку новых разведанных пластов угля.

Возникновение внезапного выброса носит вероятностный характер. Области угольного массива, в которых происходит внезапный выброс, мало отличаются по механическим или газовым свойствам от части массива, проходка которой выбросов не вызывает.

Существующие теории внезапных [2] выбросов для выбора критериев выбросоопасности используют «макроскопические» характеристики

угольного пласта.

Существенны глубина разработки и величина местного горного давления, прочность и механическая нарушенность пласта, газообильность и начальная скорость газовыделения, условия залегания, структура угольных пачек и пропластков, из которых состоит отнесенный к угрожаемым по внезапным выбросам угля и газа пласт.

Среди теорий, в которых основное внимание уделяется «микроскопическим» характеристикам состояния краевой зоны выбросоопасного угольного пласта отметим работы [4,5] академика С.А. Христиановича. Он описывает процесс возникновения системы ориентированных газонаполненных изолированных трещин, приводящей к возникновению выбросоопасного состояния.

В настоящей работе исследуется закономерность образования квазиравновесной системы ориентированных газонаполненных трещин в выбросоопасной пачке угольного пласта.

Нами получено решение линейной задачи механики сплошной однородной среды о распределении напряжений в упругой зоне впереди забоя подготовительной выработки.

Мы учли, что распределение напряжений зависит не только от координаты вглубь забоя, но и меняется также в зависимости от радиальной координаты.

Основной фактор, который мы ввели в рассмотрение, - сдвиговые деформации, возникающие в связи с действующими по периметру пласта силами трения.

Подавляющее большинство внезапных выбросов происходит впереди подготовительных выра-

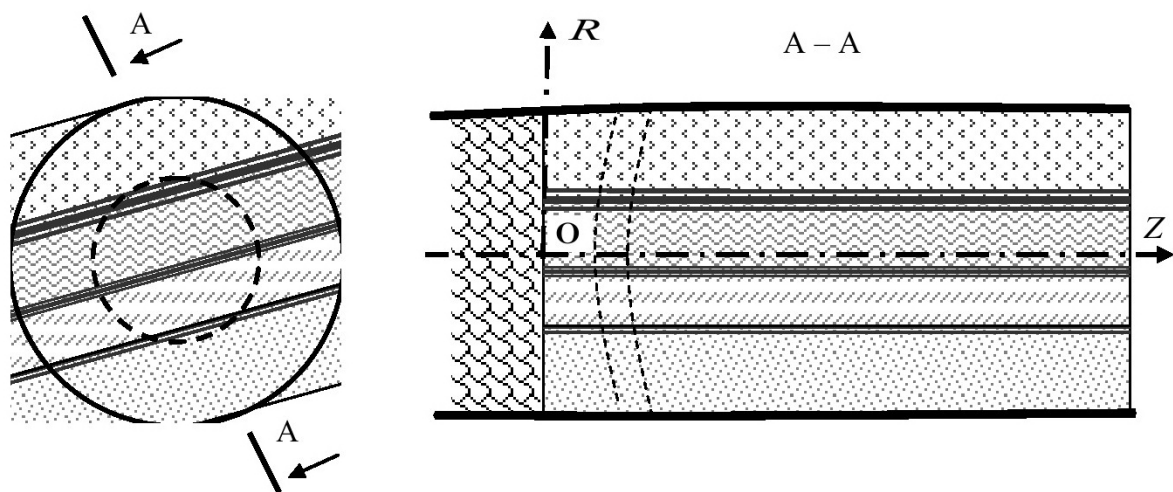


Рис. 1. Расчетная схема.

Фронт забоя подготовительной выработки. Разрез краевой зоны вдоль оси забоя

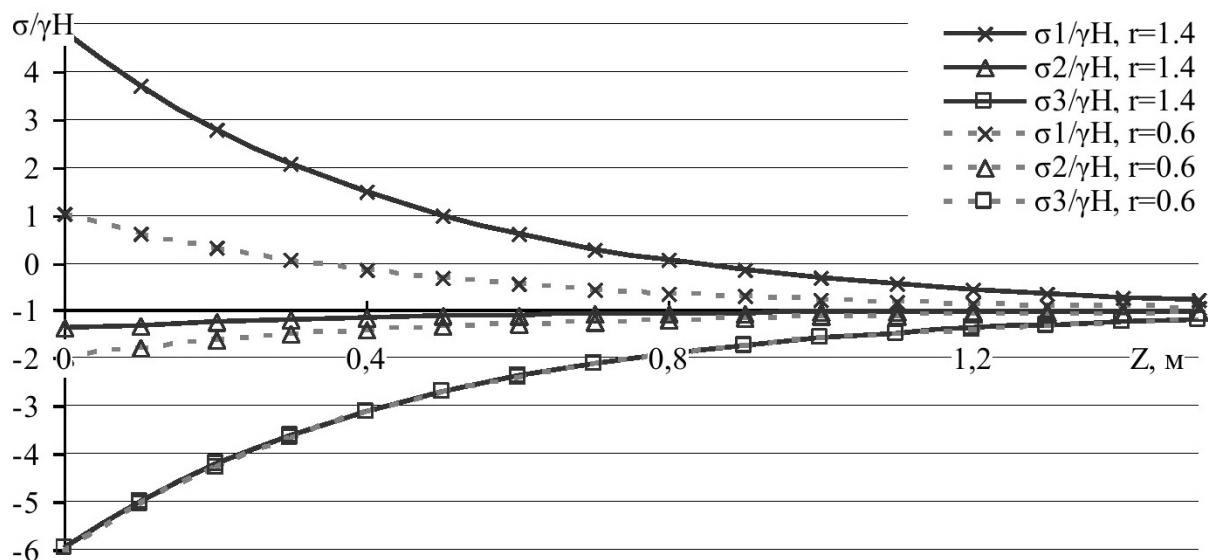


Рис.2. Распределение главных значений тензора напряжений в упругой зоне впереди забоя подготовительной выработки.

боток.

В большинстве случаев распределение напряжения в краевой зоне подготовительной выработки близко к распределению напряжений создаваемое цилиндрической полостью в сплошной среде. На рис. 1 изображена схема для расчета напряжений вблизи подготовительной выработки. Начало координат было выбрано в центре пласта на границе области упругого деформирования пласта, а область нарушенных пород, изображенная левее оси R , не учитывалась. Для расчета радиус выработки принят $R = 1.5 \text{ м}$, на бесконечности на пласт действует изотропное горное давление $-\gamma H$, положительные значения напряжений считаются растягивающими.

На рисунке также изображена схема фронта забоя подготовительной выработки в угольном пласте, состоящем из нескольких пачек и пропластков. Сплошным кругом обозначена проекция фронта забоя. Область между сплошным и штриховым кругами соответствует области, в которой одна из главных компонент тензора напряжений, соответствующего решению упругой задачи, положительна, т.е. растягивающая.

Видно, что самая нижняя и самая верхняя пачки почти полностью попадают в зону потенциального трещинообразования. Причем трещинообразование происходит в первую очередь в самой слабой и нарушенной пачке. Обычно выбросоопасная пачка является самой нижней в угольном пласте, она обладает землисто-зернистой структурой, с очень маленьким пределом прочности на разрыв, поэтому исследование возникающего в ней распределения напряжений невозможно без учета влияния образующихся и раскрывающихся газонаполненных трещин.

Главные оси тензора напряжений в получен-

ном решении упругой задачи почти совпадают с ориентацией осей цилиндрической системы координат.

Пронумеровав главные значения в порядке убывания, мы получили, что оси $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ практически параллельны осям выбранной нами цилиндрической системы координат, записанных в таком порядке: (z, θ, r) .

На рис. 2. изображено рассчитанное распределение напряжений (отнесенное к γH) в упругой зоне пласта впереди забоя подготовительной выработки вблизи периметра пласта (при $r=1.4 \text{ м}$) и в средней части (при $r=0.6 \text{ м}$). Радиальные напряжения σ_3 , практически одинаковы для обоих радиусов.

Видно, что в упругой области деформирования существует область, где одна из компонент тензора напряжений имеет положительное значение, эквивалентное растяжению. В полученном решении направление растяжения почти параллельно оси Z , соответственно, плоскости образующихся трещин будут параллельны фронту забоя.

Перераспределение напряжений приводит к образованию трещин и изменению объема пор в связи с деформацией их границ.

Мы не будем рассматривать изменение объема пор, т.к. относительное изменение объема пор [6] составляет менее двух процентов, т.е. малую величину, по сравнению с объемом возникающих трещин. С позиций выбросоопасной ситуации нас интересует только состояние массива, который в макроскопическом масштабе еще может рассматриваться как сплошной. Иными словами, угрозу представляют только состояния, в которых образующиеся трещины изолированы друг от друга и

квазиустойчивы.

Условие изолированности эквивалентно сохранению газосодержания ввиду отсутствия фильтрационных каналов.

Исследуем устойчивость и взаимодействие системы множественных трещин. Для определенности будем рассматривать длинную, протяженную трещину – щель, к которой применимы подходы плоской теории упругости. Устойчивость отдельной трещины [7] определяется соотношением Гриффитса:

$$(k_I)^2 + (k_{II})^2 \leq \frac{Eg}{1 - \nu^2}, \quad (1)$$

Здесь E, ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона, g – потенциал Гриффитса или удельная энергия образования новой поверхности, а k_I, k_{II} – первый и второй коэффициенты интенсивности напряжений.

В нашем случае можно считать, что трещины образуются под воздействием увеличивающегося (с приближением забоя) растягивающего напряжения, ориентация которого примерно постоянна и параллельна оси забоя. Плоскости возникших при этом трещин перпендикулярны оси растяжения, поэтому для бесконечной щели шириной $2L$, можно считать:

$$k_I = \frac{p}{\sqrt{\pi L}} \int_{-L}^L \sqrt{\frac{L+\xi}{L-\xi}} d\xi = p\sqrt{\pi L}, \quad k_{II} = 0. \quad (2)$$

Давление p в последней формуле имеет смысл напряжения, разрывающего трещину. В теории трещин действие p_0 – газового давления, приложенного к внутренней поверхности трещины, дополняет растягивающее напряжение σ , приложенное на расстояниях больших характерного размера трещин.

В общем случае эти две величины необходимо алгебраически суммировать, при этом если газовое давление может быть только положительным, то внешние к трещине напряжения могут быть также и отрицательными, т.е. сжимающими, так что

$$p = p_0 + \sigma. \quad (3)$$

Запишем также соотношение [9], определяющее профиль трещины, т.е. зависимость раскрытия трещины $h(x)$ от координаты x , отсчитываемой от центра щели, и связь между полушириной трещины L и амплитудой h_0 раскрытия в центре:

$$h_0 = 8\sqrt{\frac{g(1-\nu^2)}{\pi E}}\sqrt{L}; \quad h(x) = h_0\sqrt{1 - |x|/L} \quad (4)$$

Собственно, исходя из теории Гриффитса, для случая постоянного разрывающего напряжения, раскрытие единичной трещины не может быть

устойчиво. При нарушении неравенства (1) увеличивается длина трещины, следовательно, увеличивается коэффициент интенсивности напряжений (2), значит, рост трещины будет неограниченно продолжаться. Несколько другая ситуация, возникает, при возникновении напряженного состояния с постоянной деформацией. В этом случае рост трещин вызывает смещения, зависящие от амплитуды раскрытия трещин, их количества и взаимного расположения. Это приводит к сбросу напряжений вблизи раскрывшейся трещины, так что возникает устойчивое состояние увеличившейся трещины.

В теории разрушения заданное состояние с постоянными напряжениями на границе образца носит название «мягкого», а состояние с постоянными смещениями границ называется «жестким» режимом нагрузки. Обычно выбросоопасная пачка граничит с более прочными слоями угля и прослойками породы, которые отжимаются без разрушений, амплитуда их отжима определяется их собственными упругими и прочностными характеристиками. Можно считать выбросоопасную пачку зажатой между двумя жесткими плитами с заданным смещением, т.е. находящуюся в жестком режиме нагрузки, с большим количеством изолированных трещин.

Рассмотрим (рис.3) как влияют друг на друга параллельные трещины, у которых нормаль, проведенная из центра к плоскости одной из трещин 1) почти совпадает с нормалью, проведенной к плоскости другой трещины - трещины $t1$ и $t2$, и 2) если нормали не совпадают – трещины $t1$ и $t3$.

Размер зоны влияния отдельной трещины соизмерим с ее шириной. Действующие в массиве средние напряжения создают систему трещин с периодом, зависящим от величины напряжений и концентрации очагов трещинообразования.

Рассмотрим ситуацию, когда напротив одной трещины $t1$ возникает примерно такая же трещина $t2$, каждая из трещин находится в равных полях напряжений, и при изменении внешних нагрузок на массив, происходит одновременное увеличение размеров и раскрытие трещин.

При раскрытии трещин возникают смещения и деформации среды вдоль нормали к плоскости трещин. Напряжения и смещения, создаваемые одной трещиной существенны на расстояниях порядка несколько раз больших ширины трещины. Примерно посередине между плоскостями двух одинаковых трещин находится поверхность, смещения которой отсутствуют, так что ее можно считать неподвижной. Если расстояние между плоскостями трещин a , то, напротив центра трещины, дополнительные деформации ε^* и напряжения σ^* , вызванные раскрытием трещин, можно оценить так:

$$\varepsilon^* = -h_0/a$$

$$-\sigma^* = E \frac{h_0}{a} = \frac{\sqrt{L}}{a} 8 \sqrt{\frac{gE(1-v^2)}{\pi}}$$

строенная нами модель применима, когда расстояние между трещинами не более чем в три раза превосходит их ширину (которая равна $2L$). Ко-

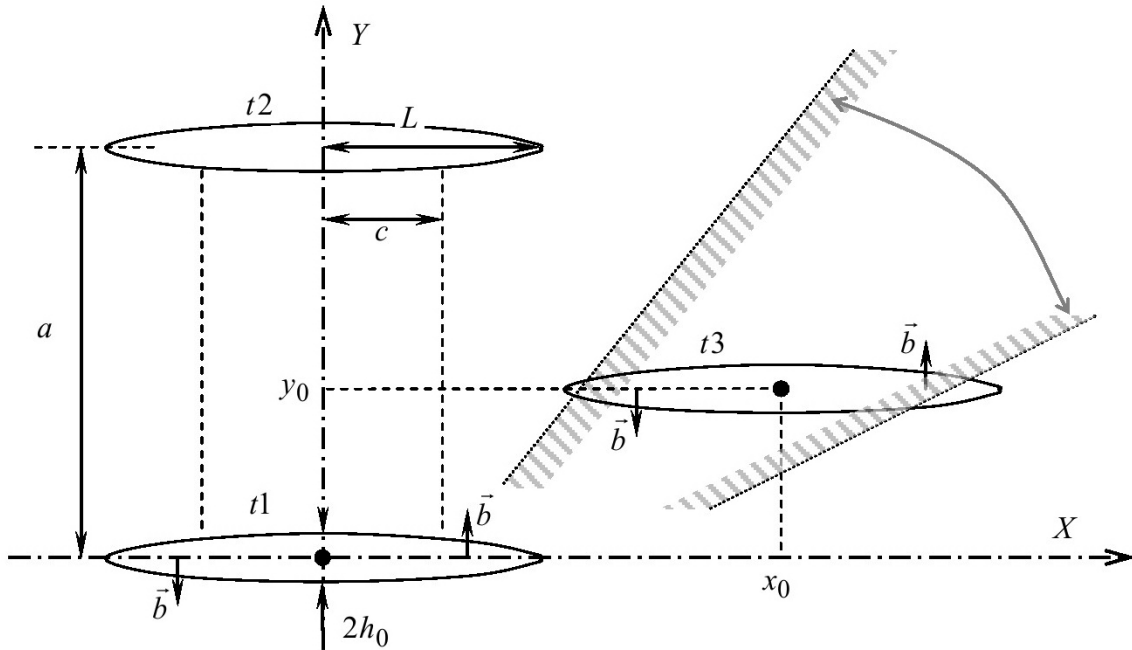


Рис. 3. Схема для расчета взаимодействия между трещинами.

t_1, t_2, t_3 - трещины, $2L$ ширина трещины, $2h_0$ - раскрытие в центре, a - расстояние между плоскостями трещин.

Будем считать, что раскрытие трещин вызывает в окружающей среде смещения, определяемые формулой (4) и направленные вдоль нормали к плоскости трещин. Если трещины достаточно близки, то напротив центров трещин упругие силы, возникающие в связи со сжатием прослойка между трещинами, могут превосходить силу газового давления. Так что, определяемое формулой (3) разрывающее напряжение в средней части границы трещины равно нулю, а коэффициент интенсивности напряжений (2) определяется только действием газового давления вблизи концов трещины.

Для построения модели примем, что разрывающее напряжения отсутствуют на расстояниях (от центра трещины) меньших c ($0 < c < L$), а в оставшейся части действует постоянное разрывающее давление p_0 .

Величина c определяется из условия $p_0 = |\sigma| = E \frac{h_0}{a} \sqrt{1-c/L}$, так что можно записать:

$$\frac{c}{L} = 1 - \left(\frac{p_0 a}{E h_0} \right)^2 = 1 - \frac{\pi}{64(1-v^2)} \frac{p_0^2 a^2}{gEL} \quad (5)$$

Если считать $p_0^2 \approx Eg / (\pi L (1-v^2))$, то по-

эффициент интенсивности напряжений можно будет определить с учетом зоны $-c < x < c$, где газовое давление компенсируется механическими напряжениями:

$$k_I = \frac{p_0}{\sqrt{\pi L}} \left\{ \int_{-L}^{-c} \sqrt{\frac{L+\xi}{L-\xi}} d\xi + \int_c^L \sqrt{\frac{L+\xi}{L-\xi}} d\xi \right\} =$$

$$= p_0 \sqrt{\pi L} \frac{2 \arccos(c/L)}{\pi} \quad (6)$$

Если расстояние между трещинами достаточно велико, то $c \approx 0$, и (6) переходит в (2). С другой стороны, если $a \ll 8L$, то, сравнивая формулу (5) с разложением косинуса вблизи нуля $\cos \alpha = 1 - 0.5\alpha^2$, можно оценить (6) коэффициент интенсивности напряжений:

$$k_I = p_0 \sqrt{\pi L} \frac{p_0 a}{\sqrt{8\pi(1-v^2)gEL}} = \frac{p_0^2 a}{\sqrt{8(1-v^2)Eg}} \quad (7)$$

Формула (7) с точностью до числового множителя подтверждает результат, описанный Бьюи [8], что коэффициент концентрации напряжений в вершинах трещин линейно убывает с уменьшением расстояния между плоскостями трещин. Бьюи описывает также опыт, аналогичный опыту Гриффитса, и показывает, что область с двумя близко-

расположенными параллельными трещинами становится более прочной, по сравнению с областью, в которой расположена одна изолированная трещина.

Рассмотрим теперь взаимодействие трещин $t1$ и $t3$, которые смещены друг относительно друга в направлении, параллельном плоскости трещин. В напряженном состоянии выбросоопасной пачки, как мы показали выше, одна из компонент тензора напряжений положительна, плоскости образующихся трещин перпендикулярны данному направлению, поэтому можно считать плоскости всех трещин параллельными друг другу.

Наличие трещины в сплошной среде эквивалентно некоторому распределению дислокаций [9] плотность которых $\rho(x)$ связана с раскрытием трещины (4) следующим образом:

$$h(x) = \int_{-L}^x \rho(\xi) d\xi.$$

Согласно Ландау [9], интеграл по поверхности, опирающейся на любой контур, равен сумме векторов Бюргера \vec{b} всех дислокационных линий, охватываемой этой поверхностью.

Для трещин функция плотности дислокаций есть - «плотность прямолинейных (вдоль оси Z), непрерывно расположенных по оси X дислокаций, векторы Бюргера которых параллельны оси Y » (рис.3).

Если мы справа и слева от начала координат выберем одинаковое направление дислокационных линий (вдоль Z), то вектор Бюргера с одной стороны оси X будет направлен параллельно оси Y , а с другой стороны оси X - антипараллельно оси Y .

Сумма всех векторов Бюргера с каждой стороны оси будет равна раскрытию трещины в цен-

$$\text{тре: } b = \int_0^L \rho(\xi) d\xi = h_0.$$

При этом концентрация дислокаций наиболее высока возле вершин трещины. Можно найти координату «центра тяжести» дислокаций одного знака

$$x_c = \frac{1}{h_0} \int_0^L \xi \rho(\xi) d\xi = \frac{2}{3} L.$$

Представим две одинаковые близко расположенные параллельные трещины $t1$ и $t3$ (рис.3) в виде дислокационных диполей. Между ними возникают силы притяжения или отталкивания, а также вращающий момент.

Если выбрать начало координат в центре одного из диполей, то координаты центра другого диполя будут (x_0, y_0) (рис.3).

В соответствии с решением стандартных задач, приведенных Ландау [9], можно рассчитать

проекции сил, действующих на единицу длины дислокационной линии со стороны одного дислокационного диполя на другой, рассматривая каждый из них как целое.

$$f_x = \frac{h_0^2 E}{4\pi(1-\nu^2)} \left(\begin{aligned} & 2 \frac{x_0(x_0^2 - y_0^2)}{(x_0^2 + y_0^2)^2} - \\ & - \frac{x_1(x_1^2 - y_0^2)}{(x_1^2 + y_0^2)^2} - \frac{x_2(x_2^2 - y_0^2)}{(x_2^2 + y_0^2)^2} \end{aligned} \right) \quad (8)$$

$$f_y = \frac{h_0^2 E}{4\pi(1-\nu^2)} \left(\begin{aligned} & 2 \frac{y_0(3x_0^2 + y_0^2)}{(x_0^2 + y_0^2)^2} - \\ & - \frac{y_0(3x_1^2 + y_0^2)}{(x_1^2 + y_0^2)^2} - \frac{y_0(3x_2^2 + y_0^2)}{(x_2^2 + y_0^2)^2} \end{aligned} \right) \quad (9)$$

Здесь $x_1 = x_0 - \frac{4}{3}L$, $x_2 = x_0 + \frac{4}{3}L$, по су-

ти x_0, x_1, x_3 - разница X - координат различных полюсов. Обе силы убывают с увеличением расстояния как $1/r$.

Для того чтобы соизмерить масштаб этих сил с внешними макроскопическими силами, вызывающими раскрытие трещин, заметим, что при попадании дислокационного диполя в однородное поле напряжений, на единицу длины дислокационной линии каждого полюса действует сила $f_x = h_0 \sigma_{yy}$, направленная вдоль плоскости трещины. Здесь σ_{yy} - компонента тензора напряжений.

Вектор Бюргера у каждого полюса имеет противоположное направление, соответственно силы, приложенные к каждому полюсу, направлены в противоположные стороны.

Постоянное поле растягивающих напряжений стремится расширить диполь.

Одновременно с этим, сами дислокационные линии с антипараллельным направлением вектора Бюргера и находящиеся на расстоянии $(4/3)L$ друг от друга притягиваются с силой

$$f_x = \frac{3h_0^2 E}{16\pi(1-\nu^2)L}, \text{ на единицу длины. Когда}$$

трещина, представленная нами в виде дислокационного диполя, находится на грани устойчивости эти две силы приблизительно равны, поэтому множитель перед большой скобкой в формулах (8,9), деленный на L , сравним с разрывающим действием макроскопических упругих сил.

На основе выражений в больших скобках (8,9) нами численно было построено поле сил, в зависимости от координат (x_0, y_0) (рис.3). Так как развитие трещин идет вдоль плоскости самой трещины и определяется, в основном, внешними

полями растягивающих напряжений, то для нас существенна f_x - сила, совпадающая с направлением развития трещины.

Численный расчет (8,9) показывает, что вокруг отдельной трещины существует область действия сил f_x отталкивания на соседнюю трещину, если при этом центр соседней трещины попадает внутрь конуса из тонких линий, показанных на рис.3.

Развитие трещин, находящихся справа от конуса отталкивания, происходит предпочтительно в сторону, противоположную ближайшей трещине. Если в процессе роста трещины ее центр заходит за конус отталкивания, то равнодействующая сила вдоль оси X становится отрицательной.

В предположении, что не меняется ориентация трещин, они стремятся занять наиболее устойчивое положение одна напротив другой, подобно трещинам t_1 и t_2 .

В том случае, когда $y_0 \approx L$ сила взаимодействия трещин примерно в два раза меньше сил, создаваемых макроскопическим упругим полем. При $y_0 \approx 0.4L$ сила взаимодействия между трещинами начинает превосходить силы создаваемые упругим полем, кроме этого, возникает момент сил, поворачивающий обе трещины к средней плоскости.

Можно считать, что если расстояние между трещинами становится сравнимым с их полушириной, возникает неустойчивое состояние, когда после пересечения конуса отталкивания совокупная сила становится притягивающей, причем она нарастает с уменьшением расстояния между трещинами и трещины мгновенно срастаются.

Это приводит к внезапному выбросу по механизму, описанному академиком Христиановичем [4,5].

Предвыбросное состояние характеризуется множественными трещинами, в среднем, равномерно заполняющими рассматриваемый объем угольного массива. Факторы взаимодействия трещин приводят к тому, что раскрывающиеся трещины «поддерживают» друг друга, а отталкивание трещин, расположенных наискосок приводит к более или менее равномерному заполнению всего объема образующимися трещинами.

В среднем, с учетом того, что ширина трещины много больше ее раскрытия, можно считать, что изолированность трещин сохраняется до тех пор, пока размеры трещин (L) не превзойдут расстояния между трещинами (a).

Будем считать расстояние между трещинами (a) заданной величиной, зависящей от механических свойств конкретного участка, от прочности угля и наличия крупных пор. Максимально возможные деформации, которые возникают без нарушения целостности массива, достигаются при $L \approx a$.

Исходя из схемы, представленной на рис. 3, и

учитывая, что основное изменение раскрытия трещины происходит вблизи ее конца, можно представить себе, что напротив средней части трещины ее раскрытие примерно постоянно, а проекции концов соседних трещин пересекаются таким образом, что средние деформации макроскопического объема угля, примерно одинаковы. С учетом (4), максимальные деформации, еще не нарушающие сплошность массива, возникающие в связи с открытием трещин, при $L \approx a$ будут:

$$\varepsilon = \frac{h_0}{a} = \frac{8}{\sqrt{a}} \sqrt{\frac{g(1-\nu^2)}{\pi E}} \quad (10)$$

Объем одной трещины получим, если площадь сечения трещины, рассчитанную интегрированием - $S = 2 \int_0^L (h_0 \sqrt{1-\xi/L}) d\xi = (4/3)Lh_0$, умно-

жим на Z_0 - длину трещины вдоль оси Z. В результате получим: $V_1 = (4/3)Lh_0Z_0$. Оценим отношение объема трещин к объему угля, приходящегося, в среднем, на одну трещину:

$$\eta = \frac{V_1}{2LaZ_0} = \frac{16}{3\sqrt{a}} \sqrt{\frac{g(1-\nu^2)}{\pi E}} \quad (11)$$

Из (10,11) видно, что чем больше концентрация трещин, тем они мельче, но массив при этом может испытывать большие смещения и деформации без нарушения макроскопической целостности. С увеличением концентрации трещин уменьшается средний максимальный размер, который может иметь единичная трещина до того, как трещины начинают срастаться друг с другом. При этом суммарный относительный объем трещин растет. Для землисто-зернистой структуры слабой выбросоопасной пачки расстояние между соседними трещинами может быть соизмеримо с размером зернения. Для оценок примем $E=1$ ГПа, $g=14$ Дж/м², $a=5 \cdot 10^{-6}$ м, $\nu=0.25$, тогда получим:

$$\varepsilon = 6\%, \quad \eta = 4\%, \quad h_0 = 0.3 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Сравнивая (10) и (11) можно заметить, что заданные деформации образуют в выбросоопасной пачке системы трещин, относительный объем которых связан с величиной относительной деформации следующим образом $\eta = (2/3)\varepsilon$. А из решения упругой задачи растягивающая компонента вызывает относительные деформации $\varepsilon = 2.4\%$, для значений $H=400$ м, $\gamma H=10$ МПа, $E=1$ ГПа. При этом, если начальная пористость выбросоопасного угля составляет 2-4%, то в процессе раскрытия трещин объем, доступный для газовой фазы может увеличиться в несколько раз.

Такое существенное увеличение объема, сначала приводит к заметному падению давления свободного газа, заключенного в порах и трещи-

нах.

Смещается физико-химическое равновесие между твердым раствором метана в угольной матрице и свободным газом. Возникают процессы десорбции, а при переходе термодинамических параметров через точку фазового равновесия газовых гидратов [10] происходит разложение гидратов метана [11].

Выводы

В построенной нами модели множественных взаимодействующих (но изолированных) трещин каждая из рассматриваемых трещин находится далеко за гранью устойчивости, если ее определять исходя из теории Гриффитса. Фактически впереди забоя создается зона раскрытых газонаполненных трещин, описанная академиком Христиановичем [4,5], однако устойчивость данной системы гораздо ниже приведенных им оценок. Максимальная амплитуда деформаций, которые может испытывать уголь выбросоопасной пачки с сохранением макроскопической целостности, увеличивается с уменьшением среднего расстояния между трещинами по закону $1/\sqrt{a}$.

До тех пор, пока не происходит срастание

трещин, отсутствуют фильтрационные каналы, сохраняется газонаполненность трещин.

С возникновением системы трещин объем, доступный для газовой фазы, увеличивается в несколько раз. Это приводит к разложению твердого метаноугольного раствора.

Оценки показывают, что для среднего расстояния между трещинами в 5 мкм максимальные деформации, которые может испытывать уголь выбросоопасной пачки, составляют 6%, при этом объем возникающих трещин составит 4% от объема твердой фазы. При превышении данного предела происходит внезапный выброс.

Описанная нами трещиноватая структура возникает при перераспределении механических напряжений в упругой зоне угольного пласта, размер этой зоны и определяет размер возможной каверны выброса, которая почти всегда ограничена несколькими метрами.

Более глубокое понимание состояния угольного пласта, из которого может развиваться внезапный выброс, позволит точнее проектировать технические воздействия, разряжающие данное состояние.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля (породы) и газа – нормативные документы Госгортехнадзора России, шифр РД 05-350-00. Кемерово 1999г.
2. Основы теории внезапных выбросов угля, породы, газа. - М. Недра, 1978.
3. *Алексеев А. Д.* Метан угольных пластов. Формы нахождения и проблемы извлечения. Вып. 87. — Днепропетровск: Изд-во ИГТМ НАНУ, 2010. – С. 10-15.
4. *Христианович С. А.* О волне выброса // Изв. АН СССР, Отд-ние техн. наук — 1953. — № 12. – С. 1679-1688.
5. *Христианович С. А.* О волне дробления // Изв. АН СССР, Отд-ние техн. наук — 1953. — № 12. – С. 1689-1699.
6. Проблемы теории пластичности и геомеханики: к 100-летию со дня рождения акад. С.А. Христиановича. — М.: Наука. 2008. – 391 с.
7. *Седов Л.И.* Механика сплошной среды: В 2т. Т.2. 6-ое изд., стер. – СПб.: Изд-во «Лань». 2004г. – 560с.
8. *Бьюи Х.Д.* Механика разрушения: обратные задачи и решения. / пер. с англ. Л.В. Степановой. – М.: Физматлит, 2011г. – 412с.
9. *Ландау, Л.Д.* Теоретическая физика: учебное пособие для вузов в 10 т. Т. VII. Теория упругости. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. – М.: Физматлит, 2003г. – 204с.
10. *Истомин В.А.* Газовые гидраты в природных условиях – М.: Недра. – 1992. – 236с.
11. *Шепелева С. А.* Газовыделение при внезапных выбросах угля и газа Шепелева С. А., Дырдин В. В. // ФТПРПИ. — 2011. — № 5. – С. 109-113.

□□ Авторы статьи:

Смирнов
Вячеслав Геннадьевич,
ст. препод. каф. физики
КузГТУ.
Email: smirnovvg@mail.ru.

Дырдин
Валерий Васильевич,
д.т.н., проф. каф. физики
КузГТУ.
Email: vvd1941@mail.ru

Шепелева
Софья Алексеевна,
к.т.н., ст. препод., каф. физики
КузГТУ.
Email: vr_sonya@mail.ru