

УДК 622.831.242

Л.И. Стефанович, Н.А. Калугина, О.Ю. Мазур

РОЛЬ РАЗГРУЗКИ В РАЗВИТИИ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ИСКОПАЕМЫХ УГЛЕЙ

Институт физики горных процессов НАН Украины

На основе изучения кривых страгивания для трещин проанализировано влияние различных факторов на выбросоопасность газонасыщенных угольных пластов. Рассмотрена ситуация, когда в угольном пласте имеется большая доля трещин, ориентированных параллельно гряды забоя. Показано, что более опасной для развития внезапного выброса является медленная разгрузка угольного пласта от внешних механических напряжений. На основе анализа кривых страгивания изучено влияния модуля сцепления угля на возникновение внезапного выброса. Показано, что выбросоопасность газонасыщенных угольных пластов, содержащих большое количество трещин, параллельных гряды забоя, существенно возрастает по мере уменьшения модуля сцепления угля. Причем для медленного сброса внешней нагрузки эта опасность оказывается более существенной.

Ключевые слова: разгрузка, трещиноватость, газонасыщенный угольный пласт, внезапный выброс, кривая страгивания.

Введение

Современные представления о характере разрушения призабойной части угольного пласта развивались и детализировались в основном в работах школы Христиановича [1, 2] и других исследователей [3 – 5]. Однако, ввиду сложного характера процессов, имеющих место при разгрузке угольного пласта, ряд вопросов, касающихся развития трещиноватости в процессе проведения горных работ остались неизученными. Так, например, до сих пор не выяснено, как влияет скорость проведения горных работ в газоносных пластах на возникновение условий для возникновения в них внезапного выброса. Кроме того, на развития трещиноватости и формирования необходимых условий для наступления внезапного выброса влияет начальная газоносность угольного пласта и его прочностные характеристики, которые определяются степенью его метаморфизма. Актуальность этих исследований связана, в конечном счете, с обеспечением безопасной работы горняков и предупреждением внезапных выбросов газугольной смеси.

Наша работа ставит целью выяснить, как влияют вышеуказанные факторы на эволюцию трещин в угле и, в конечном счете, на выбросоопасность при проведении горных работ.

Основные уравнения

Как известно, основными факторами, влияющими на формирование условий и развитие внезапного выброса, являются горное давление, создаваемое горными породами, окружающими угольный пласт, и внутрипластовое давление газообразных флюидов, содержащихся в угольных пустотах, таких как трещины, поры и т.п. В данной работе мы рассмотрим основной вид пустот, имеющих в угле – это различного рода трещины, которые могут располагаться в угольной матрице как хаотически, так и иметь определенную ориентацию. Трещины, содержащиеся в нетронutom угольном пласте, с одной стороны находятся под воздействием механических напряжений, обусловленных горным давлением, а с другой – испытывают пластовое давление газа P_0 , содержащегося в полости трещин. Горное давление σ_m , как правило, в несколько раз больше по величине давления P_0 , поэтому первоначальное состояние трещин является «задавленным», по сравнению с механически равновесным их состоянием. Находясь в таком состоянии, они не могут развиваться в том смысле, что их размер (длина) и зияние (раскрытие) не меняют своих значений со временем.

Для определенности рассмотрим пласт горизонтального залегания. Тогда при отработке угольного пласта горное давление перестает быть гидростатическим. Напряжения, продольные к обнаженной поверхности угольного пласта $\sigma_{||}$, остаются практически неизменными, тогда как поперечные по отношению к обнаженной поверхности σ_{\perp} , почти исчезают, т.е. имеет место разгрузка пласта от этой компоненты напряжений. Поэтому величина разгрузки характеризуется разностью $\sigma_m - \sigma_{\perp}$. Если в угольном пласте имеются трещины, плоскость залегания которых параллельна обнаженной поверхности (рис. 1), то после такой разгрузки может начаться процесс разрушения угля за счет развития трещин, плоскость залегания которых параллельна обнаженной поверхности. Трещины иной ориентации по-прежнему «задавлены» сжимающим их горным давлением. Если предположить, что в состоянии механического равновесия трещины имеют форму сплюснутого сфероида, с радиусом экватора r_0 и полярной полуосью c_0 (полуоткрытие трещины), то объем трещины (в общем случае) определяется объемом исходной полости и действующими напряжениями на ее берегах.

Решение классической задачи теории упругости дает для объема трещины следующее выражение [6]:

$$V = V_e + \frac{16(1-\nu^2)}{3E} T r_0^2, \quad (1)$$

где V_e - равновесный объем трещины, когда напряжение на ее берегах $T=0$, т.е.

$$V_e = \frac{4}{3} \pi r_0^2 c_0. \quad (2)$$

Здесь E – модуль Юнга исследуемого угля, ν - коэффициент Пуассона.

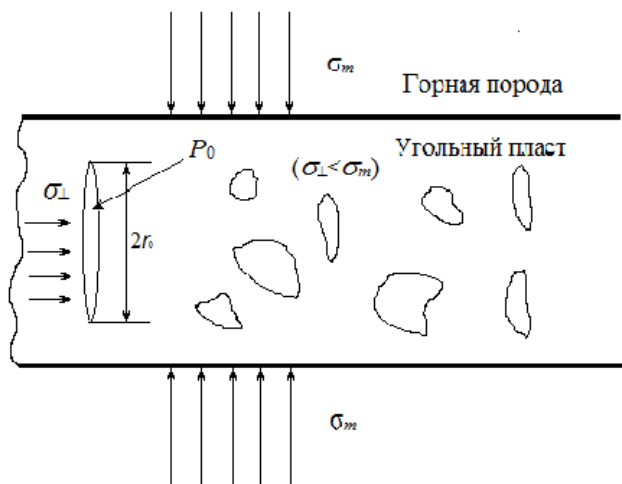


Рис. 1. Распределение напряжений в горизонтальном угольном пласте в процессе проведения горных работ

В нетронутом угольном пласте напряжение T состоит из двух слагаемых: сжимающего напряжения σ_m (горное давление) и внутрипластового давления газа P_0 , т.е. $T = \sigma_m + P_0 = -|\sigma_m| + P_0$ (так как $\sigma_m < 0$). Поскольку в нетронутом угольном пласте $|\sigma_m| > P_0$, то трещины являются как бы «задавленными». Однако это состояние трещин никак нельзя зафиксировать, не нарушив угольный пласт. Состояние же механического равновесия трещины реализуется в процессе разгрузки угольного пласта в момент, когда величина поперечного напряжения $|\sigma_m|$ сравнивается с внутрипластовым давлением газа P_0 . Тогда механическое напряжение T на берегах трещины обращается в нуль и объем трещины сводится к равновесному объему, описываемому выражением (2). Именно это состояние угля (и трещины) естественно выбрать в качестве исходного. Подобное состояние трещины отвечает точке A на рис. 2. При приложении к дискообразной трещине однородного растягивающего поля напряжений она, как известно, в сечении принимает форму эллипса с предельно заостренными концами. Как известно, на первом этапе увеличение объема трещины идет только за счет увеличения ее зияния, т.е. трещина как бы разбухает.

Силы сцепления, действующие между её противоположными берегами, особенно сильные на заостренных концах трещины, некоторое время препятствуют её распространению, т.е. увеличению её радиуса. Рост трещины начинается тогда, когда результирующее напряжение T , действующее на берегах трещины, обусловленное давлением газов внутри полости трещины,

превысит некоторую предельную величину $T_{cr}^{(1)} = P_0 - |\sigma_{cr}|$, где σ_{cr} - критическое поперечное напряжение.

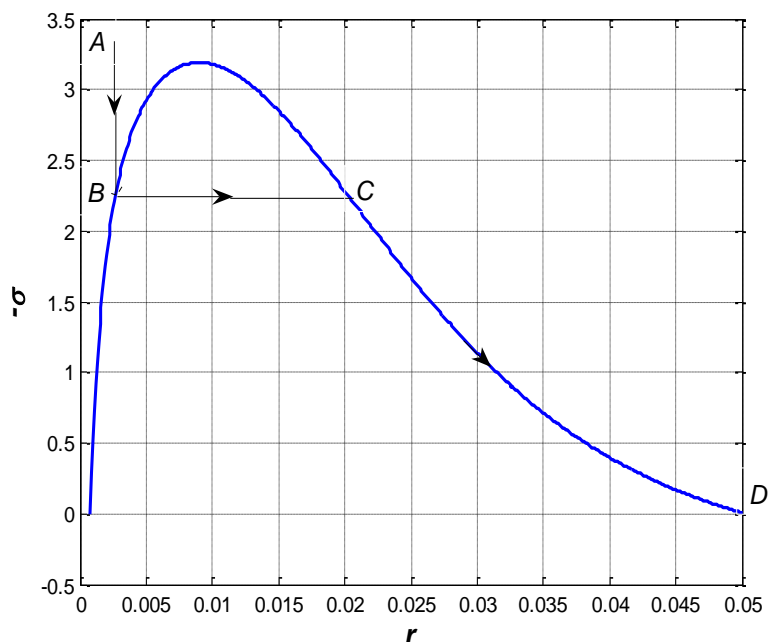


Рис. 2. Трехстадийный процесс эволюции трещины с размером $r < 0.01$ м. Этап АВ – адиабатическое увеличение зияния трещины, этап ВС – резкое увеличение радиуса, этап 3 – плавный рост объема трещины в целом. Кривая страгивания отвечает быстрой разгрузке угольного пласта, т.е. адиабатическому расширению газа внутри полости трещины ($\kappa = 4/3$). Предполагается, что полость трещины заполнена метаном

Таким образом, условие роста трещины следует из соотношения Гриффитса [7]

$$T_{cr}^{(1)} = \gamma. \quad (3)$$

Здесь $\gamma = K/\sqrt{2r_0}$, где K - модуль сцепления материала (угля), r_0 - начальный радиус трещины, отвечающий условию механического равновесия. На первой стадии эволюции трещина за счет роста ее зияния, все равно увеличивает свой объем, несмотря на то, что радиус ее не меняется. Поэтому газ внутри полости трещины расширяется. Характер же расширения газа зависит от скорости изменения внешней нагрузки σ_{\perp} . Если этот сброс происходит взрывным способом (т.е. мгновенно), то для поведения газа на первом этапе имеем адиабатический закон

$$PV^{\kappa} = P_0V_0^{\kappa}, \quad (4)$$

где $P_0, V_0^{\kappa} \equiv V_0$ - начальные, а P, V - текущие значения давления газа и объем трещины соответственно; κ - показатель адиабаты газа. Если же сброс внешней нагрузки происходит постепенно, то трещина будет расширяться

медленно (квазистатически) и, следовательно, газ внутри трещины будет подчиняться изотермическому закону, который следует из (4), если в этом равенстве положить $\kappa=1$. Чтобы проанализировать дальнейшее поведение трещины, удобно построить кривую устойчивости («кривую страгивания») трещины. Используя выражение (1) для изменения объема трещины, нагруженной по её берегам однородным напряжением, из (3) и (4) находим значение внешнего напряжения $\sigma = \sigma_{cr}$, при котором начинается рост трещины

$$\sigma_{cr} = K/\sqrt{2r_0} - P_0(1 + \beta(K/E)r_0^{5/2})^{-\kappa}, \quad (5)$$

где $\beta = 8\sqrt{2}(1-\nu^2)/3V_0$. Если рассматривать выражение (5) как функцию радиуса трещины $\sigma = \sigma(r)$, то в координатах $\sigma-r$ получаем кривую страгивания для трещин, имеющих начальный объем V_0 (рис. 2). Физический смысл имеет только та часть кривой, которая располагается в верхней полуплоскости. Исследование функции (5) на экстремум показывает, что при некотором значении начального радиуса трещины $r_* = 0.009$, кривая страгивания имеет максимум. Полагая в левой части равенства (5) $\sigma_{cr} = 0$, и, решая полученное уравнение относительно радиуса трещины r , можно найти граничные значения радиусов трещин, при которых начинается их рост. С другой стороны, граничные значения радиусов трещин r_1 и r_2 являются точками пересечения кривой страгивания с осью абсцисс (рис. 2). Данная кривая имеет важное значение при исследовании трещин на устойчивость относительно их распространения. Опираясь на кривую страгивания, можно выделить четыре группы трещин в зависимости от их начальных радиусов. Трещины, начальный радиус которых $r_0 < r_1$ и $r_0 > r_2$, не будут распространяться даже при полном сбросе внешней нагрузки. В первом случае это связано с тем, что радиус трещины настолько мал, что всегда выполняется условие $T\sqrt{2r_0} < K$, а во втором случае – настолько велик, что при уменьшении внешнего сжимающего напряжения объем трещины, согласно (1), увеличивается, а давление газа в ней соответственно уменьшается столь существенно, что также всегда выполняется аналогичное условие, ввиду малости T .

Проследим за эволюцией трещины, начальный радиус которой r_0 лежит в интервале $r_1 < r_0 < r_*$. Как уже отмечалось ранее, в качестве начального состояния трещины мы принимаем состояние её механического равновесия в точке А (рис. 2), когда результирующее механическое напряжение, действующее на берегах трещины, обращается в нуль. Тогда первый этап эволюции трещины, изображаемый вертикальным отрезком АВ, состоит только в увеличении зияния трещины при неизменном её радиусе ($r_0 = const$). Этот этап накопления упругой энергии трещинами не является опасным, т.е. не создает условий для возникновения выброса угля. Как только внешнее напряжение достигает критического значения $\sigma = \sigma_{cr}$ (точка В) происходит срыв, т.е. трещина начинает динамический рост (второй этап) за счёт резко-

го увеличения её радиуса. На этом этапе внешнее механическое напряжение не меняется $\sigma = \sigma_{cr} = \text{const}$ и развитие трещины происходит за счёт энергии упругой деформации, накопленной в угле на предыдущем этапе. Этот этап заканчивается в некоторой точке C , т.е. при таком значении радиуса трещины r_C , когда вновь выполняется условие Гриффитса

$$T_{cr}^{(2)} \sqrt{2r_0} = K, \quad (6)$$

где r_C - новое (возросшее) значение радиуса трещины, а $T_{cr}^{(2)} = P_C - |\sigma_{cr}|$ - новое механическое напряжение на берегах трещины, причем $T_{cr}^{(2)} < T_{cr}^{(1)}$, так как давление газов внутри трещины P_C в точке C меньше давления P_B в точке B из-за увеличения размеров трещины, т.е. $P_C < P_B < P_0$. Несмотря на то, что раскрытие (зияние) трещины на этом этапе может даже уменьшиться, значительный и резкий рост радиусов трещин на данном этапе («выстреливание») может привести к нарушению целостности угольного пласта и внезапному выбросу угля. Если же на этом этапе выброса не произошло, то по мере сброса внешнего механического напряжения в диапазоне напряжений $0 < |\sigma| < |\sigma_{cr}|$ будет происходить третий этап эволюции трещины, типа «дозревания», вдоль нисходящей ветви кривой страгивания от точки C до точки D при постоянном выполнении условия Гриффитса

$$T \sqrt{2r} = K, \quad (7)$$

вплоть до достижения точки D , где условие (7) принимает вид

$$P_D \sqrt{2r_2} = K. \quad (8)$$

Если же начальный радиус трещины лежит в диапазоне $r_* < r_0 < r_2$, то эволюция трещины происходит всего в два этапа, первый из которых идет за счет увеличения её зияния, т.е. соответствует её «разбуханию» (при $r_0 = \text{const}$), а второй сводится к её плавному «дозреванию», когда трещина эволюционирует вдоль кривой страгивания от точки C до точки D (рис. 2). В этом случае участок резкого (скачкообразного) возрастания радиуса («выстреливание» трещины) вообще отсутствует. Подобный путь эволюции трещин в угле является более безопасным в отношении выбросов.

Анализ выбросоопасности угля на основе изучения кривых страгивания

Для построения кривой страгивания трещины можно воспользоваться выражением (5). Поскольку мы предположили, что трещина имеет форму сплюснутого сфероида, то начальный объём трещины определяется выражением

$$V_0 = \frac{4}{3} \pi r_0^2 c_0. \quad (9)$$

Полагая в (9) $r_0 = 10^{-2}$ м; $c_0 = r_0 / \xi$, где $\xi = 100$, получаем $V_0 \approx 4.2 \cdot 10^{-8}$ м. Для механических характеристик угля примем следующие значения: модуль Юнга $E = 2.5$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, модуль сцепления $K = 2 \cdot 10^5$ Н/м^{3/2}. Внутрипластовое давление газообразных флюидов примем равным $P_0 = 5$ МПа. Причём будем считать, что полости трещин заполнены в основном газом метаном, так что показатель адиабаты $\kappa = 4/3 \approx 1.33$. Подставляя эти значения в выражение (5), получаем аналитическое выражение для кривой страгивания трещин при быстром сбросе внешней нагрузки с угольного пласта

$$\sigma_{cr}(x) = 0.14 / \sqrt{x} - 5 / (1 + 6.56 \cdot 10^3 x^{5/2})^\kappa, \quad (10)$$

где критическое напряжение страгивания выражено в МПа, а начальный радиус трещины x выражен в метрах. На рис. 2 изображена кривая страгивания на основе выражения (10) и линиями со стрелками показаны три этапа эволюции трещины AB , BC , CD .

Влияние скорости проведения горных работ на выбороопасность угля

Далее мы проанализируем выбороустойчивость угля в зависимости от скорости сброса внешнего механического напряжения, действующего на угольный пласт. Рассмотрим два предельных случая: первый отвечает очень медленному (квазистатическому) процессу уменьшения внешней механической нагрузки, действующей на угольный пласт. В этом случае можно считать, что процесс расширения газа внутри трещины на первом этапе её эволюции (участок AB) идёт изотермически. При этом кривая страгивания трещины начального объёма V_0 описывается выражением (10), где для показателя адиабаты следует взять значение $\kappa = 1$. На рис. 3 этому случаю отвечает кривая 1. Полная динамика изменения формы и размера трещины на всех этапах её эволюции при квазистатическом темпе уменьшения внешней нагрузки на угольный пласт была рассмотрена в [9]. Далее на основе выражения (10) была построена кривая страгивания трещины для случая быстрого сброса внешней механической нагрузки по закону $\sigma(t) = \sigma_m (1 - \theta(t - t_0))$, где σ_m - максимальное горное давление, действующее на угольный пласт до начала проведения горных работ. Здесь $\theta(\tau)$ - единичная ступенчатая функция Хевисайда, t_0 - момент мгновенного сброса внешней нагрузки в результате проведения, например, буровзрывных работ. На рис. 3 этому случаю соответствует кривая страгивания 2.

Из анализа кривых страгивания, представленных на этом рисунке следует, что при очень медленном снижении механических напряжений, действующих на угольный пласт (изотермический процесс расширения газа в трещине), мы получаем кривую страгивания 1, с более плавным законом

спадания на нисходящей ветви кривой $\sigma_{cr} = \sigma_{cr}(r)$, чем у кривой 2, которая отвечает очень быстрому (адиабатическому) закону расширения трещины.

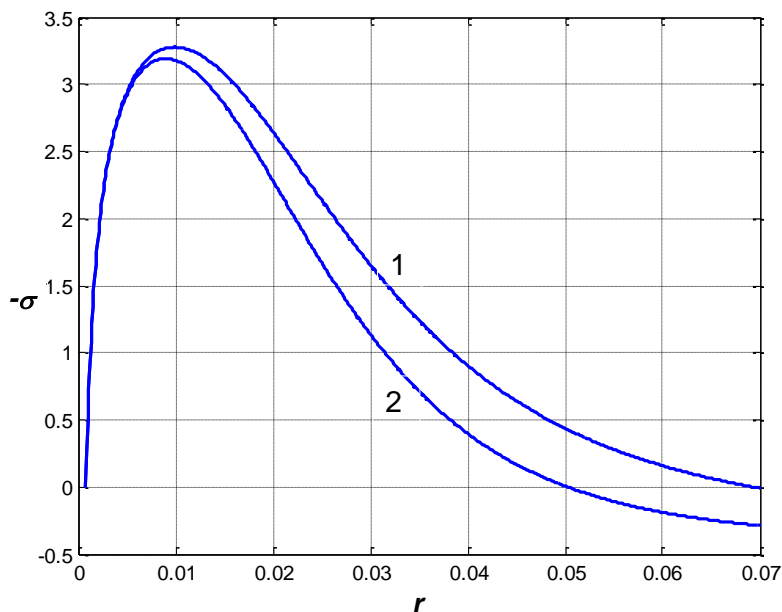


Рис. 3. Кривые страгивания в зависимости от вида процесса. Кривая 1 – отвечает изотермическому процессу расширения газа в полости трещины ($\kappa = 1$). Кривая 2 – отвечает адиабатическому процессу. Показатель адиабаты для кривой 2 равен $\kappa = 4/3$, что соответствует заполнению полости трещины метаном

Опираясь на анализ эволюции трещины, проведенный в предыдущем разделе, можно сделать заключение, что при прочих равных условиях медленный сброс внешней нагрузки заметно увеличивает длину горизонтального участка *BC* резкого (скачкообразного) «выстреливания» трещины, т.е. способствует более значительному распространению трещины, чем при резком (адиабатическом) сбросе внешних механических напряжений (кривая 2 на рис. 3). Это особенно сказывается для трещин, имеющих малый начальный радиус r_0 (но внутри диапазона $r_1 < r_0 < r^*$).

Влияние модуля сцепления угля на кривые страгивания трещин

Известно, что значения модуля сцепления угля, измеренные разными авторами, колеблются от $5 \cdot 10^4$ Н/м^{3/2} в работе [8] до $2 \cdot 10^5$ Н/м^{3/2} в [2]. К тому же очевидно, что в различных марках угля его значение будет различным. Поэтому имеет смысл исследовать влияние модуля сцепления угля на развитие его трещиноватости как при резком сбросе внешнего механического напряжения, так и в случае медленного сброса.

С этой целью на основании выражения (5) были построены кривые страгивания трещины для тех же её размеров, что и на рис. 2, 3 и при тех же самых упругих характеристиках угля, в предположении, что имеет место быстрый сброс внешней механической нагрузки, действующей на угольный пласт. Иными словами, процесс расширения трещины на первом этапе происходит адиабатически. Мы полагаем, что полости трещин заполнены в основном метаном, т.е. показатель адиабаты в (5) считается равным $4/3$. Серия кривых, представленных на рис. 4, отвечает значениям модуля сцепления угля K в диапазоне от 10^5 до $4 \cdot 10^5$ $\text{H}/\text{m}^{3/2}$, что отвечает различным маркам угля.

Как показывают кривые страгивания, представленные на рис. 4, по мере уменьшения модуля сцепления угля область неустойчивости под кривой страгивания в целом расширяется. А это означает, что горизонтальный участок BC эволюции трещины значительно увеличивает свою длину, т.е. существенно расширяется диапазон резкого «выстреливания» трещин на второй стадии их эволюции. Поэтому опасность выброса угля повышается, так как в полости трещины всё ещё содержится газ под высоким давлением.

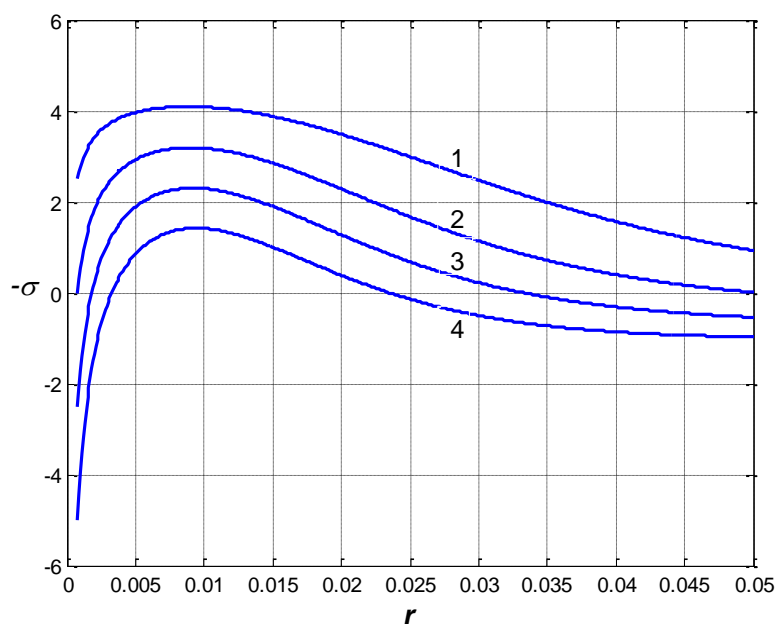


Рис. 4. Кривые страгивания в зависимости от модуля сцепления угля K . Кривые 1 – 4 отвечают значениям модулей сцепления $K_1 = 10^5$ $\text{H}/\text{m}^{3/2}$; $K_2 = 2 \cdot 10^5$ $\text{H}/\text{m}^{3/2}$; $K_3 = 3 \cdot 10^5$ $\text{H}/\text{m}^{3/2}$; $K_4 = 4 \cdot 10^5$ $\text{H}/\text{m}^{3/2}$ соответственно. По осям σ - критическое внешнее напряжение страгивания; r - радиус трещины. Процесс сброса внешнего напряжения предполагается быстрым (адиабатическим)

В принципе, та же тенденция для кривых страгивания будет наблюдаться и при медленном (квазистатическом) сбросе внешней нагрузки, когда рас-

ширения газа в полости трещин происходит изотермически. Единственным отличием является более широкий диапазон неустойчивых начальных радиусов трещин, за счет более медленного спадания нисходящей ветви зависимости $\sigma = \sigma(r)$.

Заключение

Проведенный нами анализ выбросоопасности газонасыщенных угольных пластов, опирающийся на исследование кривых страгивания трещин, показывает, что наличие большой доли трещин, ориентированных параллельно груди забоя, является особенно опасным для развития выброса при медленном снижении механической нагрузки, действующей на угольный пласт.

Кроме того, на основе анализа кривых страгивания трещин для различных марок углей, отличающихся значением модуля сцепления, можно сделать вывод, что, независимо от скорости сброса внешней нагрузки для углей, имеющих малый модуль сцепления K , опасность внезапного выброса возрастает, причём для медленного сброса внешней нагрузки эта опасность оказывается более существенной.

1. Христианович С.А. Выбросоопасные ситуации. Дробление. Волна выброса / С.А. Христианович, Р.Л. Салганик // Христианович С.А. Избранные работы. Кн. 2, С. 121 – 142. М.: Изд-во МФТИ, 2000. – 270 с.
2. Коваленко Ю.Ф. Элементарный акт явления внезапного выброса. Выброс в скважину / Ю.Ф. Коваленко // Препринт ИПМ АН СССР. – 1980. – №145.
3. Zhenlei Li. Investigation and analysis of the rock burst mechanism induced within fault-pillars / Li Zhenlei, Dou Linming, Cai Wu et al. // Int. J of Rock Mech. and Mining Sci. – 2014. – Vol. 70. – P. 192–200.
4. Wisetsaen S. Effects of loading rate and temperature on tensile strength and deformation of rock salt / S. Wisetsaen, C. Walsri, V. Fuenkajorn // Int. J of Rock Mech. And Mining Sci. – 2015. – Vol. 73. – P. 10-14.
5. Шевелев Г.А. Динамика выбросов угля породы и газа / Г.А. Шевелев. - К.: Наукова думка, 1989. – 160 с.
6. Снеддон И.Н. Преобразование Фурье / И.Н. Снеддон. - М.: ИЛ, 1955. – 667 с.
7. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids / A.A. Griffith // Phil. Trans. of the Royal Soc. of London. – 1921. – Vol. A221. – P. 163–198.
8. Алексеев А.Д. Воздействие водных растворов поверхностно-активных веществ на состояние выбросоопасных угольных пластов / А.Д. Алексеев, Н.В. Недодаев, Г.П. Стариков, Н.Н. Сереброва // Внезапные выбросы на больших глубинах. – К.: Наукова думка. 1979. – С. 45-52.
9. Калугина Н.А. Развитие магистральных трещин в газонасыщенном угольном пласте при стационарном подвигании забоя / Н.А. Калугина, Э.П. Фельдман // Физико-технические проблемы горного производства. Донецк: ИФГП НАН Украины, 2014. - Вып. 17. – С. 46-52.

Л.І. Стефанович, Н.О. Калугіна, О.Ю. Мазур

РОЛЬ РОЗВАНТАЖЕННЯ У РОЗВИТКУ ТРІЩИНУВАТОСТІ ВИКОПНОГО ВУГІЛЛЯ

На основі аналізу кривих зрушування для тріщин проаналізовано вплив різних факторів на викидобезпечність газонасичених вугільних пластів. Розглянуто ситуацію, коли в вугільному пласті є велика доля тріщин, що орієнтовані паралельно грудям забою. Показано, що більш небезпечним для розвитку раптового викиду є повільне розвантаження вугільного пласту від зовнішніх механічних напружень. На основі аналізу кривих зрушування вивчено вплив модуля зчеплення вугілля на виникнення раптового викиду. Показано, що викидобезпечність газонасичених вугільних пластів, які вміщують велику кількість тріщин, що паралельні грудям забою, суттєво зростає у міру зменшення модуля зчеплення вугілля. Причому для повільного скидання зовнішнього навантаження ця небезпека виявляється більш істотною.

Ключові слова: розвантаження, тріщинуватість, газонасичений вугільний пласт, раптовий викид, крива зрушування.

L.I. Stefanovich, N.A. Kalugina, O.Yu. Mazur

THE ROLE OF LOADING-OUT IN DEVELOPMENT OF FOSSIL COAL CRACKING

On the base of analysis crack initiation curves for the cracks the influence of different factors to outburst risk of gas-saturated coal beds is analyzed. The situation when there is the large part of cracks oriented parallel breast is considered. It is shown that the more unsafe for developing the sudden outburst is the slow loading-out of coal bed of external mechanical strains. On the base of analysis crack initiation curves the influence cohesion modulus of coal on the initiation of sudden outburst is studied. It is shown that outburst risk of gas-saturated coal beds contained the large part of cracks oriented parallel breast increases substantially as cohesion modulus of coal decreases. This dangerous is more essential for slow load of external strain.

Keywords: loading-out, cracking, gas-saturated coal beds, sudden outburst, crack initiation curve.