

## АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ИСКОПАЕМЫХ УГЛЕЙ ДЛЯ РАЗНЫХ УСЛОВИЙ РАЗГРУЗКИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

<sup>1</sup>Стефанович Л.И., <sup>2</sup>Соболев В.В., <sup>2</sup>Рудаков Д.В., <sup>2</sup>Билан Н.В.

<sup>1</sup>Институт физики горных процессов НАН Украины, <sup>2</sup>Национальный технический университет «Днепропетровская политехника»

## АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ТРІЩИНОВАТОСТІ ГАЗОНАСИЩЕНОГО ВИКОПНОГО ВУГІЛЛЯ ДЛЯ РІЗНИХ УМОВ РОЗВАНТАЖЕННЯ ВУГІЛЬНОГО ПЛАСТА

<sup>1</sup>Стефанович Л.І., <sup>2</sup>Соболев В.В., <sup>2</sup>Рудаков Д.В., <sup>2</sup>Білан Н.В.

<sup>1</sup>Институт фізики гірничих процесів НАН України, <sup>2</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

## THE ANALYSIS OF FRACTURE DEVELOPMENT IN THE GAS-SATURATED FOSSIL COAL FOR DIFFERENT CONDITIONS OF THE COAL SEAM UNLOADING

<sup>1</sup>Stefanovych L.I., <sup>2</sup>Sobolev V.V., <sup>2</sup>Rudakov D.V., <sup>2</sup>Bilan N.V.

<sup>1</sup>Institute for Physics of Mining Processes NAS of Ukraine, <sup>2</sup>National Technical University Dnipro Polytechnic

**Аннотация.** Рассмотрено развитие трещиноватости газонасыщенного ископаемого угля в условиях медленной и быстрой разгрузки угольного пласта. Исследована ситуация, когда в угольном пласте имеется большая доля трещин, ориентированных параллельно груди забоя. Были построены кривые страгивания для случаев быстрой и медленной разгрузки угольного пласта. На основе анализа этих кривых теоретически исследован трехстадийный процесс эволюции магистральных трещин в краевой части угольного пласта. Проанализировано влияние различных факторов на выбросоопасность газонасыщенных угольных пластов, а именно: скорости разгрузки угольного пласта и модуля сцепления угольного вещества. На основе сравнения кривых страгивания, описывающих процесс распространения магистральной трещины для разных условий разгрузки угольного пласта показано, что медленная разгрузка угольного пласта способствует более значительному распространению поперечных трещин в краевой части пласта, чем резкий (адиабатический) сброс внешних механических напряжений. В особенности, это сказывается для трещин, имеющих малый начальный размер. Построена серия кривых страгивания трещин для разных марок угля, имеющих различный модуль сцепления угольного вещества. На основе анализа этих кривых страгивания изучено влияния модуля сцепления угля на возникновение внезапного выброса. Установлено, что для газонасыщенных угольных пластов, содержащих систему трещин, параллельных груди забоя, выбросоопасность пласта существенно возрастает по мере уменьшения модуля сцепления угля. А это означает, что существенно расширяется диапазон резкого «выстреливания» трещин на второй стадии их эволюции. Причем для медленного сброса внешней нагрузки эта опасность оказывается более существенной. Проведенный теоретический анализ показывает, что для уменьшения опасности выброса в газоносных угольных пластах, особенно с малым модулем сцепления, выбросоопасность растет по мере увеличения скорости выработки. Целью работы является исследование влияния на развитие трещиноватости угольного пласта скорости проведения горных работ, а также прочностных характеристик угольного пласта, таких как модуль сцепления угольного вещества.

**Ключевые слова:** трещиноватость, газонасыщенный угольный пласт, кривые страгивания, скорость разгрузки угольного пласта, модуль сцепления угольного вещества, выбросоопасность.

**Введение.** В задачах, связанных с анализом явлений выбросов угля, породы и газа, возникает необходимость рассмотрения углепородного массива, содержащего газонаполненные трещины. Поэтому в работе ставится задача проанализировать с точки зрения устойчивости характер эволюции трещин малого размера в краевой части газонасыщенного угольного пласта при различных скоростях подвигания забоя.

Основные представления о характере разрушения призабойной части угольного пласта развивались и детализировались в работах [1 - 5]. Однако, ввиду сложного характера процессов, протекающих при разгрузке угольного пласта, некоторые вопросы, касающиеся развития трещин в процессе проведения горных работ остались малоизученными. Необходимо выяснить влияние скорости проведения горных работ в газоносных угольных пластах на возникновение условий для возникновения в них внезапного выброса.

Кроме того, на развитие трещиноватости и формирование необходимых условий для наступления внезапного выброса угля и газа влияет начальная газоносность угольного пласта и его прочностные характеристики, которые определяются степенью его метаморфизма. Практическая важность этих исследований, в конечном счете, связана с обеспечением безопасной работы горняков и предупреждением внезапных выбросов газугольной смеси.

### **Теоретическая часть.**

Как известно, основными факторами, влияющими на формирование условий и развитие внезапного выброса, являются горное давление, создаваемое горными породами, окружающими угольный пласт, и внутрислоевое давление газообразных флюидов, содержащихся в пустотах угольного вещества, таких как трещины, поры и т.п. Ниже 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 нетронутом угольном пласте, с одной стороны находятся под воздействием механических напряжений, обусловленных горным давлением, а с другой – испытывают внутрислоевое давление газа  $P_0$ , содержащегося в полости трещин. Горное давление  $P_m$ , как правило, в несколько раз больше по величине слоевого давления газа  $P_0$ , 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 не меняют своих значений со временем.

Ради простоты будем рассматривать пласт горизонтального залегания. При отработке угольного пласта по мере подвигания забоя происходит нарушение гидростатического характера горного давления. Напряжения, продольные к обнаженной поверхности угольного пласта  $\sigma_{||}$ , остаются практически неизменными, тогда как напряжения поперечные по отношению к обнаженной поверхности  $\sigma_{\perp}$ , уменьшаются, т.е. имеет место разгрузка пласта от этой компоненты напряжений. Величина разгрузки характеризуется разностью  $P_m - \sigma_{\perp}$ . Наиболее опасными для разрушения угля являются трещины в краевой части угольного пласта, плоскость залегания которых параллельна обнаженной поверхности (рис.1). Если в угольном пласте имеются система трещин подобной ориентации, то после разгрузки угольного пласта может начаться процесс разрушения угля за счет развития этих трещин. Трещины иной ориентации, по-прежнему, «задавлены» сжимающим их горным

давлением. Если предположить, что в состоянии механического равновесия трещины имеют форму сплюснутого эллипсоида, с радиусом экватора  $r_0$  и полярной полуосью  $z_0$  (полузияние трещины), то объем трещины определяется объемом исходной полости и действующими напряжениями на ее берегах [6]:

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

где  $V_e$  - равновесный объем трещины, когда напряжение  $T = 0$ , причём

$$V_e = \frac{4}{3} \pi r_0^2 z_0. \quad (2)$$

$E$  – модуль Юнга исследуемой марки угля,  $\nu$  - коэффициент Пуассона.

В нетронутом угольном пласте напряжение  $T$  состоит из двух слагаемых: сжимающего «поперечного» напряжения  $\sigma_{\perp}$  (напряжение бокового распора) и внутрипластового давления газа  $P_0$ , т.е.  $T = \sigma_{\perp} + P_0 = P_0 - |\sigma_{\perp}|$  (так как  $\sigma_{\perp} < 0$ ).

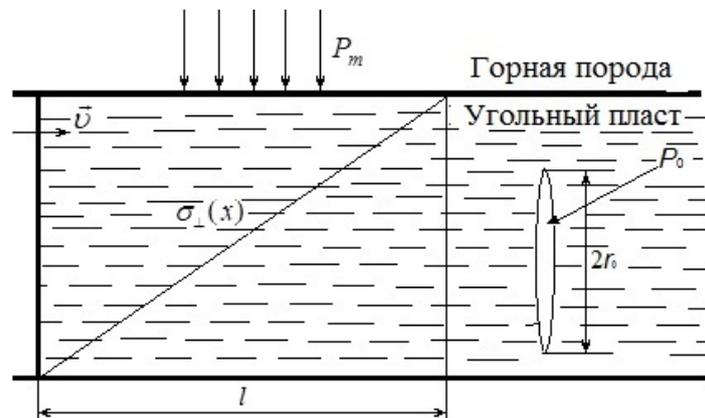


Рисунок 1 - Схематическое изображение газонасыщенного угольного пласта горизонтального залегания с трещинами.  $\bar{v}$  - скорость продвижения забоя.

Поскольку в ненарушенном угольном пласте  $|\sigma_{\perp}| > P_0$ , то трещины являются как бы «задавленными». Состояние же механического равновесия трещины реализуется в процессе разгрузки угольного пласта в момент, когда величина напряжения бокового распора  $\sigma_{\perp}$  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 трещины естественно выбрать за исходное. Подобное состояние трещины отвечает точке  $A$  на рис. 2,3. При приложении к дискообразной трещине однородного растягивающего поля напряжений она принимает в сечении форму эллипса с заостренными концами и на первом этапе происходит увеличение объема трещины только за счет увеличения зияния. Молекулярные силы сцепления, действующие между её противоположными берегами, некоторое время препятствуют её удлинению.

Рост трещины начинается тогда, когда результирующее напряжение  $T$ , действующее на берегах трещины, обусловленное давлением газов внутри полости трещины, превысит некоторую предельную (критическую) величину  $T_{cr}^{(1)} = P_0 - |\sigma_{cr}|$ , где  $\sigma_{cr}$  - критическое напряжение бокового распора. Условие роста трещины следует из соотношения Гриффитса [7]

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

Здесь  $\gamma = M_c / \sqrt{2r_0}$ , где  $M_c$  - модуль сцепления угля,  $r_0$  - начальный радиус трещины, отвечающий условию механического равновесия.

На первой стадии эволюции объем трещины растет только за счет роста ее зияния, несмотря на то, что радиус ее не меняется. Поэтому газ внутри полости трещины расширяется. Очевидно, что эволюция трещиноватости в различных ситуациях будет протекать по-разному. Ниже мы рассмотрим два предельных случая: а) случай медленной разгрузки и б) случай быстрой разгрузки угольного пласта.

Рассмотрим вначале эволюцию трещиноватости при квазистационарном подвигании забоя. При этом мы используем приближение «слабой фильтрации», т.е. предполагаем, что отсутствуют как утечка газа из угольного пласта, так и поступление газа в пласт. Если сброс напряжения бокового распора происходит в результате медленного (т.е. квазистационарного) подвигания забоя, то поведение газа в полости трещины на первом этапе подчиняется изотермическому закону

$$PV = P_0V_0, \quad (4)$$

где  $P_0, V_e \equiv V_0$  - начальные, а  $P, V$  - текущие значения давления газа и объем трещины соответственно.

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

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

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 в общем виде кривую страгивания для трещин, имеющих начальный объем  $V_0$  (рис. 2).

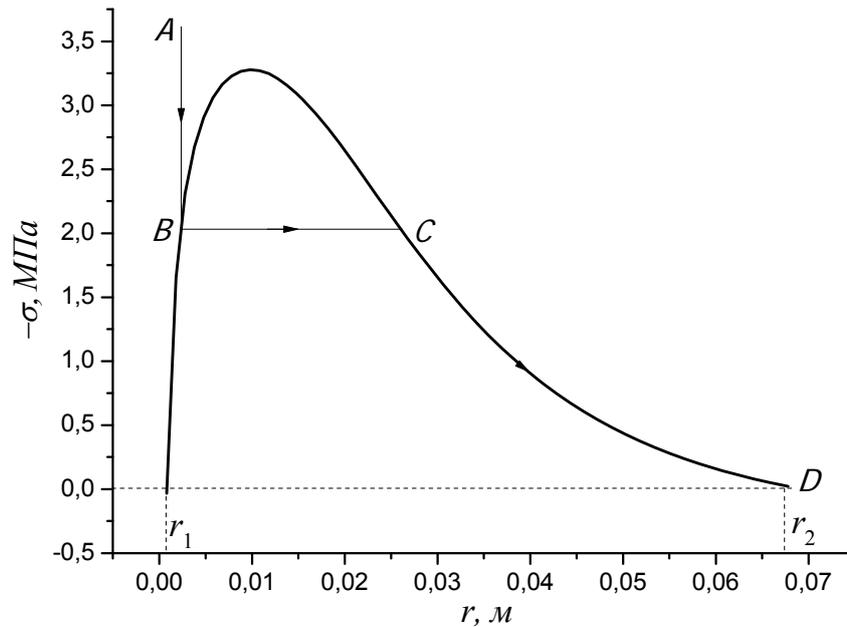


Рисунок 2 - Кривая страгивания трещины. Стрелками показан трехстадийный процесс эволюции магистральной краевой трещины.

Следует рассматривать только ту часть кривой, которая располагается в верхней полуплоскости, так как именно она имеет физический смысл. 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). Опираясь на эту кривую, 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 неравенство  $T\sqrt{2r_0} < M_c$ , 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 A (рис. 2), когда результирующее механическое напряжение, действующее на берегах трещины, обращается в нуль. Тогда первый этап эволюции трещины, изображаемый вертикальным отрезком AB, 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  $B$ ) происходит срыв, т.е. трещина начинает динамический рост (второй этап) за счёт резкого увеличения её радиуса. На этом этапе внешнее механическое напряжение не меняется  $\sigma = \sigma_{cr} = const$  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

$$T_{cr}^{(2)} \sqrt{2r_C} = M_C, \quad (6)$$

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 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  $0 < |\sigma| < |\sigma_{cr}|$  наступает третий этап эволюции трещины, когда её «дозревание» происходит вдоль нисходящей ветви кривой страгивания от точки  $C$  до точки  $D$  при постоянном выполнении условия Гриффитса

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

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

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

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  $r_0 = const$ ), 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 («выстреливания» трещины) вообще отсутствует. Подобный путь эволюции трещин в угле является наиболее безопасным в отношении выбросов.

Проведем анализ выбросоопасности угля на основе изучения кривых страгивания. Для конкретного построения кривой страгивания трещины можно воспользоваться выражением (5). Поскольку мы предположили, что трещина имеет форму сплюснутого сфероида, то начальный объём трещины

определяется выражением (2). Полагая в (2)  $r_0 = 10^{-2}$  м;  $z_0 = r_0/\xi$ , 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  $M_c = 2 \cdot 10^5$  Н/м<sup>3/2</sup>. Внутрипластовое давление газообразных флюидов примем равным  $P_0 = 5$  МПа. Причём будем считать, что полости трещин заполнены в основном газом метаном. Подставляя эти значения в выражение (5), получаем аналитическое выражение для кривой страгивания трещин при медленной разгрузке с угольного пласта

$$\sigma_{cr} = 0.14/\sqrt{x} - 5/(1 + 6.57 \cdot 10^3 x^{5/2})^k, \quad (9)$$

где критическое напряжение страгивания выражено в МПа, а радиус трещины  $x$  выражен в метрах, а показатель степени  $k$  можно положить равным единице.

Если рассматривать случай быстрой разгрузки угольного пласта, то сброс внешней механической нагрузки происходит внезапным образом, например, по закону

$$\sigma_{\perp}(t) = \sigma_m(1 - \theta(t - t_0)), \quad (10)$$

где  $\sigma_m$  - максимальное горное давление, действующее на угольный пласт до начала проведения горных работ,  $\theta(\tau)$  - единичная ступенчатая функция Хевисайда,  $t_0$  - момент мгновенного сброса внешней нагрузки в результате проведения, например, буровзрывных работ.

Если снижение напряжения бокового распора происходит быстро, то поведения газа в трещине на первом этапе подчиняется адиабатическому закону

$$P(t)V^k(t) = P_0V_0^k, \quad (11)$$

где  $P_0, V_e \equiv V_0$  - начальные, а  $P, V$  - текущие значения давления газа и объем трещины соответственно;  $k$  - показатель адиабаты (в случае заполнения трещин метаном  $k = 4/3$ ).

Если в (9) положить  $k = 4/3$ , то мы получим кривую страгивания трещин для быстрой разгрузки угольного пласта. На рис. 3 изображены кривые страгивания на основе выражения (9), как для быстрой, так и для медленной разгрузки угольного пласта, а линиями со стрелками показаны три этапа эволюции трещины для каждой кривой страгивания трещины.

**Результаты и их обсуждение.** Вначале мы проанализируем влияния скорости разгрузки на выбросоопасность угля. Заметим, что скорость сброса внешнего механического напряжения, действующего на угольный пласт, определяется скоростью подвигания забоя.

Рассмотрим два предельных случая: первый отвечает очень медленному (квазистатическому) процессу уменьшения внешней механической нагрузки, действующей на угольный пласт.

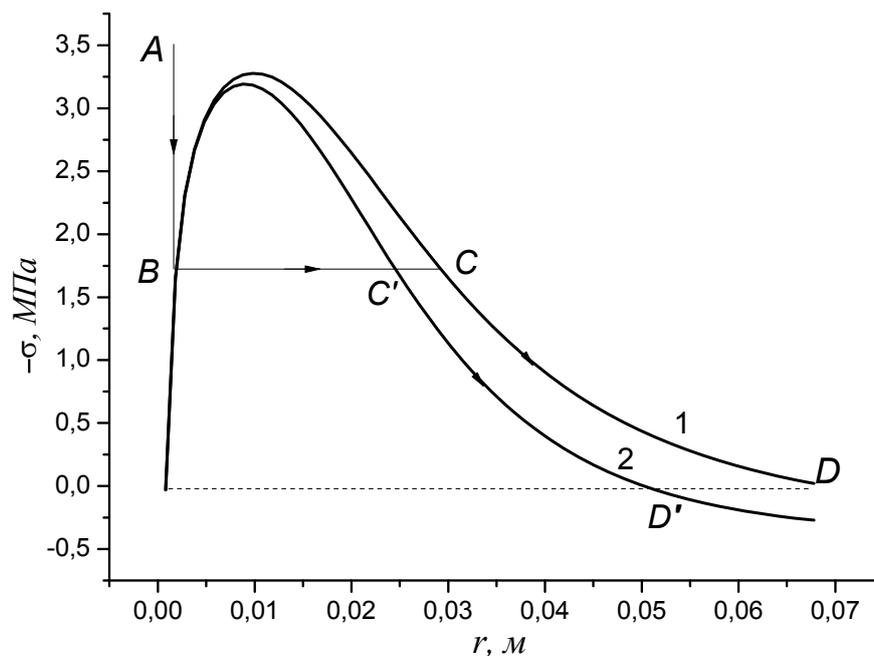


Рисунок 3. Кривые страгивания в зависимости от скорости разгрузки угольного пласта. Кривая 1 – отвечает изотермическому процессу расширения газа в полости трещины  $\kappa = 1$ . Кривая 2 – отвечает адиабатическому процессу  $\kappa = 4/3$ .

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 (9), 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 [8]. Далее на основе выражения (9) была построена кривая страгивания трещины для случая быстрого сброса внешней механической нагрузки по закону (10). 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 нисходящей ветви кривой  $\sigma_{cr} = \sigma_{cr}(r)$ , чем у кривой 2, которая отвечает очень быстрому (адиабатическому) закону расширения газа в трещине. 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  $r_1 < r_0 < r_*$ ). Следует отметить, что данная модель является довольно

грубой, поскольку даже при медленной разгрузке мы не учитывали фильтрационных процессов натекания газа в трещину и истекания газов из полости трещины в забой. Они могут существенно повлиять на развитие трещин в краевой части угольного пласта.

Далее мы проанализируем, как влияет модуль сцепления угля на кривые страгивания и как следствие, на выбросоопасность газонасыщенного угольного пласта. Известно, что значения модуля сцепления угля, измеренные разными авторами, колеблются от  $5 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^{3/2}$  в работе [9] до  $2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^{3/2}$  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 его медленного сброса.

С этой целью на основании выражения (9) 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 медленный сброс внешней механической нагрузки, действующей на угольный пласт. Иными словами, процесс расширения трещины на первом этапе происходит изотермически. Мы полагаем, что полости трещин заполнены в основном метаном, т.е. показатель адиабаты в (9) и (11) считается равным единице ( $\kappa = 1$ ). Серия кривых, представленных на рис. 4, отвечает значениям модуля сцепления угля  $M_c$  в диапазоне от  $10^5$  до  $4 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^{3/2}$ , что отвечает различным маркам угля.

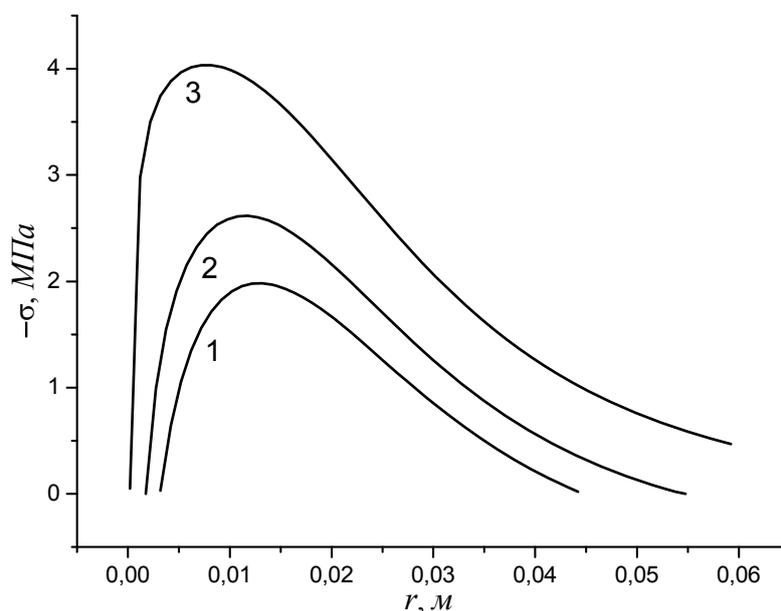


Рисунок 4. Кривые страгивания в зависимости от модуля сцепления угля  $M_c$ . Кривые 1 – 3 отвечают значениям  $M_{c1} = 4 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^{3/2}$ ;  $M_{c2} = 3 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^{3/2}$ ;  $M_{c1} = 10^5 \text{ Н/м}^{3/2}$  соответственно. По осям  $\sigma$  - критическое внешнее напряжение страгивания;  $r$  - радиус трещины. Процесс сброса внешнего напряжения предполагается медленным.

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. Та же тенденция для кривых страгивания будет наблюдаться и при внезапном (быстром) сбросе внешней нагрузки, когда расширения газа в полости трещин происходит адиабатически. Единственным отличием является более узкий диапазон неустойчивых начальных радиусов трещин, за счет более быстрого спадания нисходящей ветви зависимости  $\sigma = \sigma(r)$ .

**Выводы.** Проведенный 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  $M_c$ , опасность внезапного выброса возрастает, причём эта опасность оказывается более существенной именно для медленного сброса внешней нагрузки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко Ю.Ф. Элементарный акт явления внезапного выброса. Выброс в скважину. Москва: Ин-т проблем механики, 1980. 145, 44 с. (Препринт. Ин-т пробл. механики. АН СССР).
2. Христианович С.А., Салганик Р.Л. Выбросоопасные ситуации. Дробление. Волна выброса. *Избранные работы*. Кн.2 Московский физико-технич. ин-т. Москва, 2000. С.121 – 142.
3. Шевелев Г.А. Динамика выбросов угля породы и газа. Киев: Наукова думка, 1989. 160 с.
4. Li Zhenlei, Dou Linming, Cai Wu [et al.] Investigation and analysis of the rock burst mechanism induced within fault-pillars. *Int. J of Rock Mech. and Mining Sci.* 2014. Vol. 70. P.192–200.
5. S. Wisetsaen, C. Walsri, V. Fuenkajorn. Effects of loading rate and temperature on tensile strength and deformation of rock salt. *Int. J. of Rock Mech. And Mining Sci.* 2015. Vol. 73. P.10-14.
6. Снеддон И.Н. Преобразование Фурье. Москва: Иностран. литература, 1955. 667с.
7. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil. Trans. of the Royal Soc. of London.* 1921. Vol. A221. P.163–198.
8. Калугина Н.А., Фельдман Э.П. Развитие магистральных трещин в газонасыщенном угольном пласте при стационарном подвигании забоя. Физико-технические проблемы горного производства. Донецк: ИФГП НАН Украины, 2014. - Вып.17. С. 46-52.
9. Алексеев А.Д., Недодаев Н.В., Стариков Г.П., Сереброва Н.Н. Воздействие водных растворов поверхностно-активных веществ на состояние выбросоопасных угольных пластов. Внезапные выбросы на больших глубинах: монография / Алексеев А.Д. Киев: Наукова думка, 1979. С. 45-52.

#### REFERENCES

1. Kovalenko Yu.F. (1980), "The elementary act of the phenomenon of sudden outburst. Outburst into the well." *Preprint.AS USSR*. No. 145, 44 p.
2. Khristianovich S.A. and Salganik R.L. (2000), "Outburst-dangerous situations. Splitting up. Outburst wave". [Khristianovich S.A. Selected Works. Book.2], Publisher MPTI, Moscow, RU, pp.121
3. Shevelev G.A. (1989), *Dinamika vybrosov uglja, porody i gaza* [Dynamics of outbursts of coal rock and gas]. Naukova dumka, Kiev, SU.
4. Li Zhenlei, Dou Linming, Cai Wu [et al] (2014), "Investigation and analysis of the rock burst mechanism induced within fault-pillars", *Int. J of Rock Mech. and Mining Sci.*, vol. 70. pp. 192–200.
5. Wisetsaen S., Walsri C. and Fuenkajorn V. (2015), "Effects of loading rate and temperature on tensile strength and

deformation of rock salt", *Int. J. of Rock Mech. and Mining Sci.*, vol. 73. pp. 10-14.

6. Sneddon I.N. (1955), *Preobrazovanie Fur'e* [Fourier Transformation], Inostrannaya Literatura, Moscow, Russia.

7. Griffith A.A. (1921), "The phenomena of rupture and flow in solids", *Phil. Trans. of the Royal Soc. of London*, vol. A221. pp. 163–198.

8. Kalugina N.A. and Feldman E.P. (2014), "Development of main cracks in a gas-saturated coal seam with stationary propulsion of the face", *Physical and technical problems of mining production*. Donetsk: IPMP NAS of Ukraine, iss. 17. pp. 46-52.

9. Alexeev A.D., Nedodaev N.V. Starikov G.P. and Serebrova N.N. (1979) "Effect of aqueous solutions of surfactants on the state of outburst coal seams." *Sudden outbursts on great depths*. Kiev: Naukova dumka. pp. 45-52.

---

#### Об авторах

**Стефанович Леонід Ільич**, доктор фізико-математических наук, старший научний співробітник, заступник директора інститута по науковій роботі, Інститут фізики горних процесів Національної академії наук України (ІФГП НАН України), Дніпро, Україна, [lstef2591@ukr.net](mailto:lstef2591@ukr.net)

**Соболев Валерій Вікторович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (НТУ «Дніпровська політехніка» МОН України), Дніпро, Україна, [velo1947@ukr.net](mailto:velo1947@ukr.net)

**Рудаков Дмитрій Вікторович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри гідрогеології і інженерної геології, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (НТУ «Дніпровська політехніка» МОН України), Дніпро, Україна, [rudakovdv21@ukr.net](mailto:rudakovdv21@ukr.net)

**Билан Наталія Валеріївна**, кандидат геол.-мін. наук, доцент кафедри гідрогеології і інженерної геології, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» МОН України (НТУ «Дніпровська політехніка» МОН України), Дніпро, Україна, [bilanatan@gmail.com](mailto:bilanatan@gmail.com)

#### About the authors

**Stefanovych Leonid Illich**, Doctor of Physics and Mathematics (D.Sc.), Deputy Director of the Institute for Scientific Work, Institute for Physics of Mining Processes NAS of Ukraine (IPMP, NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, [lstef2591@ukr.net](mailto:lstef2591@ukr.net)

**Sobolev Valerii Viktorovich**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor of the Department of Construction, Geotechnics. and Geomechanics, National Technical University "Dniprovskaya politechnica" (NTU "DP"), Dnipro, Ukraine, [velo1947@ukr.net](mailto:velo1947@ukr.net)

**Rudakov Dmytro Victorovich**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Department of Hydrogeology and Engineering Geology, National Technical University "Dniprovskaya politechnica" (NTU "DP"), Dnipro, Ukraine, [rudakovdv21@ukr.net](mailto:rudakovdv21@ukr.net)

**Bilan Natalia Valeriivna** Candidate of Geology and Mineralogy (Ph. D), Associate Professor of Department of Hydrogeology and Engineering Geology, National Technical University "Dniprovskaya politechnica" (NTU "DP"), Dnipro, Ukraine, [bilanatan@gmail.com](mailto:bilanatan@gmail.com)

---

**Анотація.** Розглянуто розвиток тріщинуватості газонасиченого вкопного вугілля в умовах повільного та швидкого розвантаження вугільного пласта. Досліджено ситуацію, коли в вугільному пласті є велика частка тріщин, які орієнтовані паралельно грудей вибою. Було побудовано криві зрушення для випадків швидкого і повільного розвантаження вугільного пласта. На основі аналізу цих кривих було теоретично досліджено трьохстадійний процес еволюції магістральних тріщин в крайовій частині вугільного пласта. Проаналізовано вплив різних чинників на викидонебезпечність газонасичених вугільних пластів, а саме: швидкості розвантаження вугільного пласта і модуля зчеплення вугільної речовини. На основі порівняння кривих зрушення, що описують процес поширення магістральної тріщини для різних умов розвантаження вугільного пласта показано, що повільне розвантаження вугільного пласта сприяє більш значному поширенню поперечних тріщин в крайовій частині пласта, ніж різке (адіабатичне) скидання зовнішніх механічних напружень. Особливо, це позначається для тріщин, що мають малий початковий розмір. Побудована серія кривих зрушення тріщин для різних марок вугілля, що мають різний модуль зчеплення вугільної речовини. На основі аналізу цих кривих зрушення вивчено вплив модуля зчеплення вугілля на виникнення раптового викиду. Встановлено, що для газонасичених вугільних пластів, що містять систему тріщин, паралельних грудей вибою, викидонебезпечність пласта істотно зростає в міру зменшення модуля зчеплення вугілля. А це означає, що істотно розширюється діапазон різкого «вистрілювання» тріщин на другій стадії їх еволюції. Причому для повільного скидання зовнішнього навантаження ця небезпека виявляється більш істотною. Проведений теоретичний аналіз показує, що для зменшення небезпеки викиду у газонасичених вугільних пластах, особливо з малим модулем зчеплення, викидонебезпечність зростає в міру збільшення швидкості вироблення. Метою роботи є дослідження впливу на розвиток тріщинуватості вугільного пласта швидкості проведення гірничих робіт, а також міцності вугільного пласта, таких як модуль зчеплення вугільної речовини.

**Ключові слова:** тріщинуватість, газонасичений вугільний пласт, криві зрушення, швидкість розвантаження вугільного пласта, модуль зчеплення вугільної речовини, викидонебезпечність.

**Annotation.** Development of fracturing of gas-saturated coal seam under conditions of its slow and fast unloading was considered. The situation when great proportion of cracks in the coal seam are oriented parallel to the bottom of the face was studied. Curves of crack initiation at fast and slow unloading of coal seam were constructed. Basing on the analysis of these curves, a three-stage process of major crack evolution in the marginal part of the coal seam was theoretically investigated. Influence of various factors on the proneness-to-outburst of gas-saturated coal seams was analyzed, namely: rates of the coal seam unloading and modulus of the coal substance adhesion. On the basis of comparison of the curves of crack initiation, which describe the process of main crack propagation at different conditions of coal seam unloading, it is shown that slow unloading of the coal seam leads to a greater spread of transverse cracks in the marginal part of the formation in comparison with the sharp (adiabatic) unloading of external mechanical stresses. This phenomenon is especially characteristic for the small initial cracks. A series of cracking curves was constructed for various coal grades with different moduli of the coal substance adhesion. Having analyzed these crack initiation curves, influence of the coal adhesion modulus on the occurrence of a sudden outburst was determined. It is established that in case of gas-saturated coal seams containing a system of cracks parallel to the bottom of the face, the outburst hazard of the coal seam increases significantly with decrease of the coal adhesion modulus. This means that the range of sharp "shooting" of cracks at the second stage of their evolution is significantly expanding. Moreover, this danger is more significant at slow unloading of the external load. The theoretical analysis shows that in order to reduce risk of outburst in gas-bearing coal seams, especially with a small adhesion modulus, it should be taken into account that outburst danger increases with increases of the rate of the working driving. The aim of the work is to study effect of the speed of mining operations and strength characteristics of the coal seam, such as modulus of the coal substance adhesion, on the coal seam fracturing .

**Keywords:** fracturing, gas-saturated coal seam, crack initiation curves, rate of coal seam unloading , adhesion modulus of the coal substance, outburst hazard.

*Стаття надійшла до редакції 23.09. 2019*

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук Скіпочкою С.І.*