

## ЭВОЛЮЦИЯ ТРЕЩИН В КРАЕВОЙ ЧАСТИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ ЕГО СТАЦИОНАРНОЙ ОТРАБОТКЕ

Э. Фельдман<sup>1</sup>, Н. Калугина<sup>2\*</sup>, О. Чеснокова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Отдел физики угля и горных пород, Институт физики горных процессов НАН Украины, Днепр, Украина

<sup>2</sup>Институт физики горных процессов НАН Украины, Днепр, Украина

\*Ответственный автор: e-mail [kalugina\\_n\\_a@ukr.net](mailto:kalugina_n_a@ukr.net), тел. +380958298140

## EVOLUTION OF CRACKS IN SELVEDGE OF THE COAL BED DURING ITS STATIONARY WORKING

E. Feldman<sup>1</sup>, N. Kalugina<sup>2\*</sup>, O. Chesnokova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Coal and Rock Physics Department, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

<sup>2</sup>Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

\*Corresponding author: e-mail [kalugina\\_n\\_a@ukr.net](mailto:kalugina_n_a@ukr.net), тел. +380958298140

### ABSTRACT

**Purpose.** To study rupturing of the coal/rock seam selvedge by natural gas-filled cracks as phenomena that prepare and initiate sudden outbursts of coal, rock, and gas during the steady movement of the face.

**Methods.** The work is based on theoretical studies, including methods of thermodynamics, statistical physics, and asymptotic analysis.

**Findings.** A generalized Griffith's criterion for the material rupture by a crack is applied to the selvedge part of a gas-saturated coal/rock seam during its stationary unloading.

**Originality.** The kinetic theory describing processes of gas-containing materials destruction is developed using the example of rupturing the selvedge part of a coal/rock seam by natural gas-filled cracks.

**Practical implications.** The criterion for changing the control parameters (reservoir gas pressure, crack dimensions, rock pressure, surface coal/rock energy, elastic modulus) is found at which spontaneous failure of the seam becomes possible. This allows to discuss the possibility of predicting sudden outbursts of coal, rock and gas.

**Keywords:** main crack, gas, coal bed, face advance

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В угольном пласте всегда имеются трещины различной ориентации, размеров и зияния. В нетронутом газонасыщенном пласте трещины не эволюционируют, поскольку они задавлены горным давлением, которое в несколько раз превышает пластовое давление газа. В процессе обработки пласта происходит перераспределение напряжений, обусловленных горным давлением. Для пласта горизонтального залегания, который является предметом исследования в предлагаемой работе, вертикальная компонента напряжений трансформируется в опорное давление, которое изменяется по простиранию пласта, достигая максимума на расстоянии порядка нескольких толщин пласта от рабочей поверхности забоя. Горизонтальная составляющая, поперечная по отношению к этой поверхности, исчезает на этой поверхности

(точнее она равна давлению газа на этой поверхности), а по мере отхода от этой поверхности в глубь пласта она нарастает, достигая предельного значения, характерного для нетронутого пласта. Трещины, плоскость залегания которых параллельна поверхности забоя и находящиеся вблизи забоя, освобождаются в разной мере от сжимающих напряжений. Трещины горизонтального и, отчасти, наклонные трещины по-прежнему "задавлены" горным давлением и поэтому не эволюционируют. Поэтому имеет смысл рассматривать лишь эволюцию "поперечных" трещин. Сжимающие поперечные напряжения, могут сниматься как внезапно, при отработке пласта взрывом, так и постепенно, при стационарной отработке пласта с определенной скоростью подвигания забоя. Оба эти типа отработки инициируют эволюцию краевых трещин за счет разрывного действия газа, находящегося в полости трещин.

Однако протекание процессов эволюции существенно различается для двух указанных видов обработки. Первый из этих случаев, то есть внезапная разгрузка пласта от поперечных напряжений, рассмотрен нами ранее (Feldman, Kalugina, & Meln'ik, 2017). В предлагаемой работе изучаются детали временной эволюции трещин, происходящей по мере движения поверхности забоя с постоянной скоростью. Как и ранее (Feldman, Kalugina, & Meln'ik, 2017), теория эволюции системы трещин строится в контексте идеи “среднего” поля (main field approximation). Суть этого подхода состоит в том, что вместо системы трещин рассматривается одна, магистральная, трещина. Роль остальных трещин состоит в формировании среднего поля напряжений в окружении магистральной трещины, а также в формировании резервуара газа, которым окружение может обмениваться с выделенной трещиной. В свою очередь магистральная трещина воздействует на параметры окружающего “термостата”, так что теория самосогласуется.

Развитие трещины происходит как за счет постепенной разгрузки, так и за счет натекания или истечения газа из полости трещины в окружающий угольный материал. Обработка газонасыщенного угольного пласта сопровождается не только перераспределением напряжений горного давления, но и созданием поверхности, через которую газ (обычно метан) из пласта вытекает в выработанное пространство. Давление газа в пласте падает, что создает термодинамическую силу для истечения газа из полости трещин в окружающий материал. В свою очередь это меняет разрывающую нагрузку на берега трещины, а тем самым темп ее эволюции. Конкретные детали упомянутых процессов и построение формульных критериев разрушения и внезапных выбросов в краевой части угольного пласта изучаются далее.

## 2. ЭВОЛЮЦИЯ МАГИСТРАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ ОТСУТСТВИИ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА

Расположение магистральной трещины в обрабатываемом угольном пласте изображено на Рисунке 1, взятом из работы (Feldman, Vasilenko, & Kalugina, 2014).

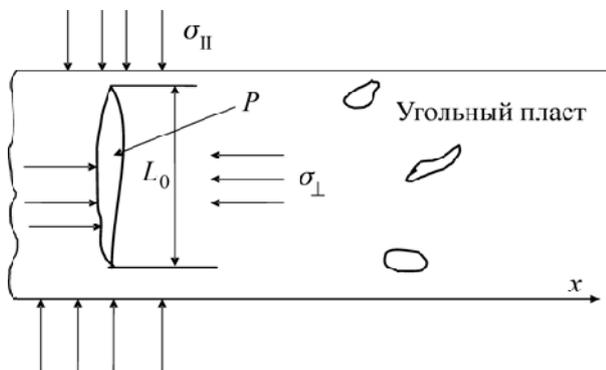


Рисунок 1. Схема расположения трещин в газонасыщенном угольном пласте

В момент времени, выбранном в качестве начального ( $t = 0$ ) трещина располагается на расстоянии  $l$  от рабочей поверхности забоя. Предполагается, что

зависимость “поперечных” напряжений от координаты  $x$ , отсчитываемой от забоя внутрь пласта по его простиранию, линейна, то есть:

$$\sigma_{\perp}(x) = -\frac{\sigma_m x}{l}, \text{ если } 0 < x < l; \quad (1)$$

$$\sigma_{\perp}(x) = -\sigma_m, \text{ если } x > l. \quad (2)$$

Здесь  $l$  можно считать размером зоны разгрузки,  $\sigma_m$  – “поперечные” напряжения (напряжения бокового распора) в нетронутом пласте. По порядку величин они равны половине горного давления. Знак “–” означает сжатие. В процессе штатной обработки пласта расстояние от поверхности забоя до трещины уменьшается по линейному закону:

$$x = l - vt = l \left( 1 - \frac{vt}{l} \right), \quad (3)$$

где:

$v$  – скорость подвигания забоя.

Следовательно, в соответствии с (1) напряжение бокового распора на трещине в произвольный момент:

$$\sigma_{\perp}(x) = -\sigma_m \left( 1 - \frac{vt}{l} \right). \quad (4)$$

В начальный момент  $\sigma_{\perp}(t) = -\sigma_m$ , то есть разгрузка отсутствует, сжатие трещин максимально. В момент  $t = l/v$  сжатие исчезает,  $\sigma_{\perp}$  обращается в ноль. Трещина в этот момент “поглощается” забоем.

Из теории трещин (Landau & Lifshits, 2003) известно, что изменение ее объема за счет действующих на ее берега напряжений пропорционально этим напряжениям и площади трещины. Поскольку мы исследуем двумерную модель трещины, то речь вместо объема идет о квадрате длины:

$$V(t) = V_0 + \frac{\sigma_m}{B} L_0^2 - \frac{\sigma_{\perp}(t)}{B} L^2(t), \quad (5)$$

где:

$V_0$  – начальный объем полости трещины (в плоской задаче это площадь ее сечения);

$B$  – упругий модуль угля;

$L_0$  – начальная длина трещины;

$L(t)$  – длина в момент  $t$ .

В формуле (5) не учтен вклад пластового давления газа, распирающего трещину, на ее объем, поскольку газовое давление в несколько раз меньше сжимающих “поперечных” напряжений.

Введем безразмерные время  $\tau \equiv \frac{vt}{l}$ , начальное значение  $z_0 = \frac{V_0}{L_0^2}$ , и параметр  $a_m \equiv \frac{\sigma_m}{BV_0} L_0^2 \equiv \frac{\sigma_m L_0}{Bz_0}$ .

Тогда формула для зависимости объема трещин (в двумерном случае – площади) от времени приобретает вид:

$$V(\tau) = V_0 \left( 1 + a_m - a_m (1 - \tau) \frac{L^2(\tau)}{L_0^2} \right). \quad (6)$$

Если длина трещины не меняется в процессе ее эволюции, то есть  $L(\tau) = L_0$ , то формула (6) сильно упрощается:

$$V(\tau) = V_0(1 + a_m \tau), \quad (7)$$

то есть объем трещины возрастает по мере разгрузки пласта. Трещина разбухает, ее зияние возрастает.

Поскольку здесь изучается модель отсутствия фильтрации, то в рассматриваемом случае количество газа в полости трещины не меняется. Значит, согласно уравнению состояния газа:

$$P(\tau)V(\tau) = P_0V_0, \quad (8)$$

где:

$P_0$  – пластовое давление газа, оно же начальное давление газа в полости трещины;

$P(\tau)$  – давление в произвольный момент.

Следовательно, давление:

$$P(\tau) = \frac{P_0V_0}{V(\tau)}. \quad (9)$$

При  $L(\tau) = L_0$  имеем соотношение:

$$P(\tau) = \frac{P_0}{1 + a_m \tau}, \quad (10)$$

то есть давление газа в трещине убывает, становясь равным  $P_0 / (1 + a_m)$  при  $\tau = 1$ , то есть в момент поглощения трещины забоем.

Полная нагрузка на берега трещины состоит из давления газа (растягивающего) и сжимающих напряжений –  $\sigma_d(\tau) = P(\tau) + \sigma_{\perp}(\tau)$ , или с учетом (10) и (4):

$$\sigma_d(\tau) = \frac{P_0}{1 + a_m \tau} - \sigma_m(1 - \tau). \quad (11)$$

В начальный момент полная нагрузка сжимает трещину,  $\sigma_d(0) = P_0 - \sigma_m$ , поскольку, как уже указывалось  $\sigma_m$  всегда в несколько раз больше  $P_0$ .

Но затем, по мере разгрузки, сжимающие напряжения уменьшаются, в определенный момент суммарная нагрузка становится растягивающей, достигая наибольшего значения  $P_0 / (1 + a_m)$  в момент  $\tau = 1$ . График временной зависимости полной нагрузки (нормированной на  $P_0$ ) от времени приведен на Рисунке 2.

Разрыв трещины, согласно Гриффитсу (Griffith, 1920; Varenblatt, 1961) происходит, если коэффициент концентрации напряжений в вершине трещины превосходит модуль сцепления материала  $M_c$ , то есть когда:

$$\frac{\pi}{2} \sigma_d(\tau) \sqrt{L(\tau)} \geq M_c, \quad (12)$$

или, поскольку, на этапе разгрузки длина трещины не меняется, то есть  $L(\tau) = L_0$ , этот разрыв происходит в момент  $\tau = \tau_{cr}$ , определяемый из уравнения:

$$\frac{\sigma_d(\tau)}{P_0} = \frac{M_c}{M_0}, \quad M_0 = \frac{\pi}{2} P_0 \sqrt{L_0}. \quad (13)$$

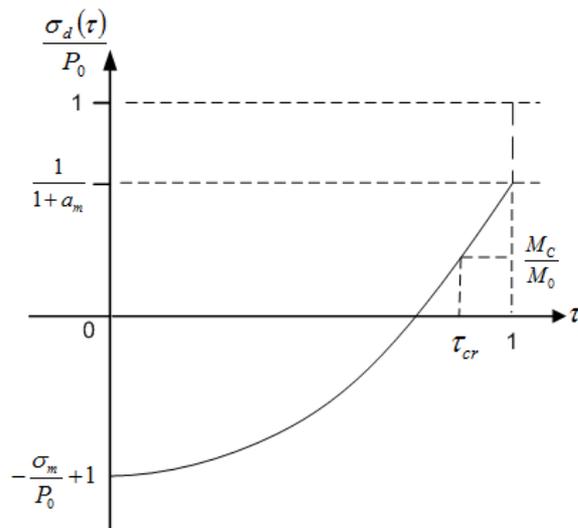


Рисунок 2. График зависимости полной нагрузки от времени

Графическое решение уравнения приведено на Рисунке 2. Видно, что необходимым условием существования критического времени в интервале  $\tau < 1$  является выполнение неравенства:

$$\frac{M_c}{M_0} < \frac{1}{1 + a_m}. \quad (14)$$

Это и есть обобщенный критерий Гриффитса разрыва материала трещиной, полученный ранее в (Feldman, Kalugina, & Meln'ik, 2017), иным способом. Если это неравенство не соблюдается, то трещина при стационарной нагрузке эволюционирует лишь за счет разбухания, то есть увеличения зияния.

Критический момент  $\tau_{cr}$  близок к единице, так что:

$$(1 - \tau_{cr}) \approx \frac{P_0}{\sigma_m} \left( \frac{1}{1 + a_m} - \frac{M_c}{M_0} \right). \quad (15)$$

Близость  $\tau_{cr}$  к единице обусловлена малостью  $P_0$  по сравнению с  $\sigma_m$ , а так же, возможно, и близостью  $1/(1 + a_m)$  к своему критическому значению  $M_c/M_0$ .

После достижения нагрузкой критического гриффитсовского значения развитие трещины может, в принципе, осуществляться по двум сценариям. По первому из них, в этот момент происходит мгновенный разрыв пласта магистральной трещиной. По второму сценарию, при дальнейшем увеличении нагрузки длина трещины возрастает, объем трещины увеличивается, давление в ней падает, так что в любой момент выполняется “гриффитсовское” равенство:

$$\frac{\pi}{2} \sigma_d(\tau) \sqrt{L(\tau)} = M_c = const, \quad (16)$$

то есть в любой момент  $\tau > \tau_{cr}$ .

Однако, исследование, базирующееся на анализе последнего равенства на устойчивость при  $L(\tau)$  близком к  $L_0$ , показывает, что из-за монотонного роста  $\sigma_d(\tau)$ , длина трещины должна монотонно убывать, то есть  $L(\tau) < L_0$ , что лишено физического смысла.

Таким образом, при выполнении критерия (14) и отсутствии фильтрации газа при приближении забоя к магистральной трещине в момент  $\tau = \tau_{cr}$ , произойдет скачкообразный рост трещины, который может привести к внезапному выбросу угля и газа.

### 3. ВЫВОДЫ

Применение теории Гриффитса разрушения хрупких материалов позволяет исследовать эволюцию трещин в краевой части угольного пласта, происходящую по мере движения поверхности забоя с постоянной скоростью. Для случая отсутствия фильтрации газа получен критерий разрыва пласта трещиной (14), позволяющий учесть динамику напряженного состояния пласта, его свойства, пластовое давление газа, размеры трещин, скорость продвижения забоя. Если (14) не соблюдается, то происходит лишь разбухание трещины. Выполнение этого критерия позволяет оценить время, при котором произойдет скачкообразный рост трещины. Рассмотрение влияния фильтрации газа, содержащегося в угольном пласте, позволит в дальнейшем учесть изменчивость разрывающей нагрузки на берега трещины, уточнить темп ее эволюции.

### ABSTRACT (IN RUSSIAN)

**Цель.** Исследование процессов разрыва краевой части угольного/породного пласта природными газонаполненными трещинами как явлений, подготавливающих и инициирующих внезапные выбросы угля, породы и газа при стационарном продвижении забоя.

**Методика.** Работа выполнена на основе теоретических исследований, включающих методы термодинамики, статистической физики, асимптотического анализа.

**Результаты.** Получен обобщенный критерий Гриффитса разрыва материала трещиной применительно к краевой части газонасыщенного угольного/породного пласта при его стационарной разгрузке.

**Научная новизна.** Развита кинетическая теория процессов разрушения газосодержащих материалов на стадии разрыва краевой части угольного/породного пласта природными газонаполненными трещинами.

**Практическая значимость.** Найден критерий изменения управляющих параметров (пластового давления газа, размеров трещин, горного давления, поверхностной энергии угля/породы, модуля упругости), при котором спонтанное разрушение пласта становится возможным. Это позволяет обсуждать возможность прогноза внезапных выбросов угля, породы и газа.

**Ключевые слова:** магистральная трещина, газ, угольный пласт, продвижение забоя

### ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

**Мета.** Дослідження процесів розриву крайової частини вугільного/породного пласта природними газонаповненими тріщинами як явищ, що підготовлюють та ініціюють раптові викиди вугілля, породи й газу при стаціонарному просуванні вибою.

**Методика.** Робота виконана на основі теоретичних досліджень, що включають методи термодинаміки, статистичної фізики, асимптотичного аналізу.

**Результати.** Отримано узагальнений критерій Гріффітса розриву матеріалу тріщиною стосовно крайової частини газонасиченого вугільного/породного пласта при його стаціонарному розвантаженні.

**Наукова новизна.** Розвинено кінетичну теорію процесів руйнування матеріалів, що містять газ, на прикладі розриву крайової частини вугільного/породного пласта природними газонаповненими тріщинами.

**Практична значимість.** Знайдено критерій зміни керуючих параметрів (пластового тиску газу, розмірів тріщин, гірського тиску, поверхневої енергії вугілля/породи, модуля пружності), при якому спонтанне руйнування пласта стає можливим. Це дозволяє обговорювати можливість прогнозу раптових викидів вугілля, породи і газу.

**Ключові слова:** магистральна тріщина, газ, вугільний пласт, просування вибою

### ARTICLE INFO

Received: 2 March 2017

Accepted: 22 May 2017

Available online: 30 June 2017

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской темы НАН Украины “Массо-, теплоперенос и физика предвыбросных явлений в газонасыщенном трещиновато-пористом слоистом углепородном массиве”.

### REFERENCES

- Barenblatt, G. (1961). Matematicheskaya teoriya ravnovesnyh treschin, obrazuyuschihya pri hrupkom razrushenii. *Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika*, (4), 3-56.
- Fel'dman, E.P., Vasilenko, T.A., & Kalugina, N.A. (2014). Physical Kinetics of Coal-Methane System: Mass Transfer, Pre-Outburst Events. *Journal of Mining Science*, 50(3), 448-464. <https://doi.org/10.1134/s1062739114030077>
- Feldman, E.P., Kalugina, N.A., & Meln'ik, T.N. (2017). Role of Unloading and Filtration of Gas in the Development of Main Cracks in Coal Seams. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 58(1), 155-164. <https://doi.org/10.1134/s0021894417010175>
- Griffith, A. (1920). The Phenomenon of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, (221), 163-198.
- Landau, L., & Lifshits, E. (2003). *Teoreticheskaya fizika*. Moskva: Fizmatlit.

## **ABOUT AUTHORS**

Eduard Feldman, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher of the Coal and Rock Physics Department, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Simferopolska St, 49005, Dnipro, Ukraine. E-mail: [feldman40@ukr.net](mailto:feldman40@ukr.net)

Nadiia Kalugina, Doctor of Technical Sciences, Scientific Secretary of the Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Simferopolska St, 49005, Dnipro, Ukraine. E-mail: [kalugina\\_n\\_a@ukr.net](mailto:kalugina_n_a@ukr.net)

Oksana Chesnokova, Researcher of the Coal and Rock Physics Department, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Simferopolska St, 49005, Dnipro, Ukraine. E-mail: [chesnokova0507@gmail.com](mailto:chesnokova0507@gmail.com)