

УДК 622.831: 622.537.86

ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА НА ЭВОЛЮЦИЮ МАГИСТРАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ ПОДВИГАНИИ ЗАБОЯ**¹Фельдман Э.П., ¹Калугина Н.А., ¹Чеснокова О.В.**¹*Институт физики горных процессов НАН Украины***ВПЛИВ ФІЛЬТРАЦІЇ ГАЗУ НА ЕВОЛЮЦІЮ МАГІСТРАЛЬНОЇ ТРИЩИНИ ПРИ СТАЦІОНАРНОМУ ПОСУВАННІ ВИБОЮ****¹Фельдман Е.П., ¹Калугіна Н.О., ¹Чеснокова О.В.**¹*Институт фізики гірничих процесів НАН України***INFLUENCE OF GAS FILTRATION ON MAIN CRACK DEVELOPMENT DURING STATIONARY FACE DRIVAGE****¹Feldman E.P., ¹Kalugina N.O., ¹Chesnokova O.V.**¹*Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine*

Аннотация. На основе сопоставления кинетики двух физических процессов, одновременно происходящих при разработке пластов газозольных месторождений – разгрузки угольного пласта от горного давления и фильтрации метана в угле установлен критерий развязывания спонтанного разрушения призабойного участка газонасыщенного угольного пласта при стационарном подвигании забоя. При подвигании забоя напряжения, сжимающие трещины, содержащиеся в угольном пласте, постепенно уменьшаются (разгрузка пласта), что способствует развитию трещин. Одновременно происходит сброс давления газа в полостях трещин за счёт его выхода в выработанное пространство, что приостанавливает развитие трещин. Поэтому результат эволюции трещин зависит от того, какой из двух этих конкурирующих процессов идёт быстрее. Используя идею «среднего» поля (mean field approximation), вместо системы трещин рассматривается одна, магистральная трещина, действующая на параметры окружающего «термостата». Найденное соотношение включает в себя, как необходимое условие, выполнение критерия Гриффитса разрыва материала газонаполненной трещиной. Критерий позволяет установить роль физических параметров угольного пласта – горного давления, газового давления, упругих модулей, трещиноватости, сил сцепления материала, фильтрации метана в угле и технологических параметров отработки для безопасных по выбросу условий разработки угольного месторождения. Построена диаграмма зависимости скорости подвигания забоя от скорости фильтрации газа, на которой указаны опасный и безопасный по выбросу секторы.

Диаграмма позволяет выбрать экономически целесообразную, и вместе с тем безопасную скорость отработки пласта с учётом его физико-химических свойств и геотехнологических условий отработки. Материальные параметры, входящие в полученное неравенство, определяются лабораторными и натурными экспериментами, в том числе и проведенными в ИФГП НАН Украины.

Ключевые слова: трещина, угольный пласт, газ, фильтрация, выброс, давление, разгрузка.

Угольный пласт содержит различного рода поры и трещины, которые до его отработки не приходят в движение. Трещины «задавлены» горным давлением. При отработке угольного (породного) пласта в его краевой части происходит разгрузка от напряжений, порождённых горным давлением. Собственно, горное давление на этом участке становится неоднородным – возникает опорное давление. Напряжения, поперечные по отношению к граничной поверхности забоя (боковой распор) резко снижаются. После разгрузки трещины увеличивают свой объём, разбухают, поскольку сдавливание исчезает частично или даже полностью [1]. Если полость трещины не заполнена газом, то этим разбуханием развитие трещин вследствие разгрузки пласта и ограничивается. Но, как правило, в порах и трещинах угольных пластов и вмещающих пород сосредоточен газ, обычно это метан. И хотя давление газа, заполняющего полости трещин (пластовое давление), в несколько раз меньше горного давления [2], после разгрузки роль давления газа становится определяющей. Газ стремится разорвать пласт.

Разрыв происходит, если коэффициент концентрации напряжений в устье трещины превосходит модуль сцепления материала. Против разрыва действует спад давления газа вследствие выхода газа наружу и, несмотря на фильтрацию газа из окружающего материала в трещину. Поэтому решающую роль в разрыве пласта начинает играть соотношение указанных скоростей фильтрации между собой, а также со скоростью разгрузки. Последняя определяется технологическими регламентами угледобычи. В [3] методами теоретической физики проанализировано явление развития магистральных трещин угольного пласта, спровоцированного быстрой разгрузкой. Даны оценочные критерии реализации и времени разрушения краевого участка пласта. Исследования показали, что для развязывания выброса необходимо большое пластовое давление газа, наличие системы трещин большой длины и большого зияния, расположенных на определённом расстоянии друг от друга, внезапную разгрузку, близкую к максимальной, малый коэффициент фильтрации газа через поверхность забоя, уголь или породу с малой удельной поверхностной энергией.

В данной работе исследуются особенности временной эволюции трещин, происходящей по мере движения поверхности забоя с постоянной скоростью. Используя идею «среднего» поля (mean field approximation), вместо системы трещин рассматривается одна, магистральная трещина, действующая на параметры окружающего «термостата». Остальные трещины формируют среднее поле напряжений в окружении магистральной трещины и служат резервуаром газа, для обмена окружения с выделенной трещиной. В [4] исследована эволюция магистральной трещины при отсутствии фильтрации газа. Но при наличии фильтрации газа развитие трещины происходит как за счёт постепенной разгрузки, так и за счёт натекания или истечения газа из полости трещины в окружающий угольный каркас.

Рассмотрим ситуацию, при которой по мере движения забоя происходит как разгрузка берегов трещины от сжимающих напряжений, так и стечение газа из полости трещины, сопровождаемое сбросом давления газа. В [4] показано, что полная нагрузка на берега трещины состоит из двух слагаемых: давления газа полости $p(\tau)$ в произвольный момент времени, и сжимающих напряжений

$\frac{\sigma_m}{P_0}(1 - \tau)$. Здесь все нагрузки нормированы на P_0 – пластовое давление газа, оно

же начальное давление газа в полости трещины. σ_m – «поперечные» напряжения (напряжения бокового распора) в нетронутом пласте. Время τ обезразмерено –

$\tau \equiv \frac{vt}{l}$, где v – скорость подвигания забоя, а l расстояние от трещины до рабочей

поверхности забоя.

Эти слагаемые изменяют нагрузку в противоположных направлениях: сброс горного давления увеличивает разрывающую нагрузку, а фильтрация уменьшает её. Идёт как бы «игра на опережение»: что изменяется быстрее – разгрузка или фильтрация?

При определённых условиях растягивающая нагрузка вырастет настолько, что коэффициент концентрации напряжений в устье трещины $M_0 = \frac{\pi}{2} P_0 \sqrt{L_0}$ (L_0 – начальная длина трещины) превзойдёт модуль сцепления материала M_c . В результате трещина, согласно Гриффитсу [5], разорвёт пласт, что можно соотнести с внезапным выбросом. Критический момент и критическое давление определяются уравнением

$$p(\tau) - \frac{\sigma_m}{P_0}(1 - \tau) = \frac{M_c}{M_0}. \quad (1)$$

Перепишем уравнение, перенеся разгрузку в правую часть:

$$p(\tau) = \frac{\sigma_m}{P_0}(1 - \tau) + \frac{M_c}{M_0}. \quad (2)$$

Если существует решение этого уравнения на интервале $0 \leq \tau \leq 1$, то наступает момент, по достижении которого трещина разорвёт пласт. Если же решение отсутствует или физически бессмысленно, то произойдёт лишь разбухание трещины без разрыва пласта. Необходимо найти, таким образом, критерий существования решения (2).

С этой целью произведём графический анализ (2) в случае, когда $p(\tau)$ совпадает с $p_e(t)$ – давлением газа в угольной матрице вблизи трещины, нормированным на P_0 . Затем сделаем нужные обобщения.

В [6] исследовано поведение функции $p_e(t)$ – изменения давления газа с течением времени в окрестности магистральной трещины при равномерном движении забоя при разных значениях параметра $b = \frac{D_f}{lv}$. Здесь D_f – коэффициент фильтрации газа, характеризующий проницаемость угля при фильтрации метана.

Схематически график правой и левой частей уравнения (2) изображены на рис. 1. Для определённости считаем, что параметр $b \ll 1$.

На рис. 1 показаны – точка τ_{cr} пересечения прямой $\frac{\sigma_m}{P_0}(1 - \tau) + \frac{M_c}{M_0}$ с еди-

ницей, и точка τ_e , где начинается отклонение $p(\tau)$ от единицы. Можно с хорошей точностью утверждать, что решение (2) существует тогда и только тогда, когда точка τ_e лежит правее точки τ_{cr} , то есть когда фильтрация запаздывает по сравнению с разгрузкой

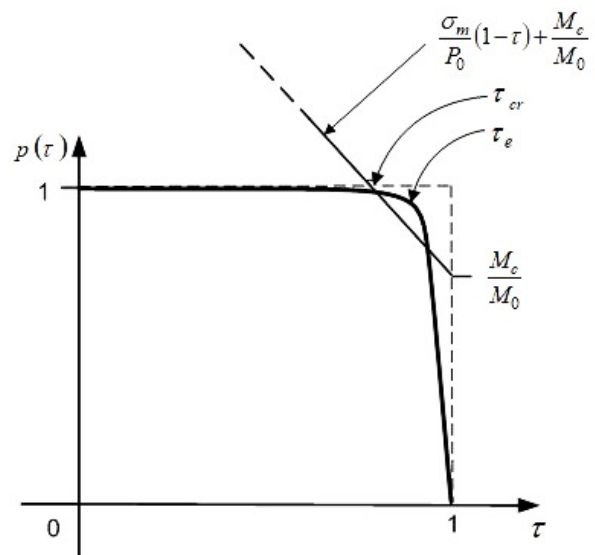


Рисунок 1 – Графическое решение уравнения (2) при $p(\tau) = p_e(t)$

$$1 - \tau_e < 1 - \tau_{cr} \quad (3)$$

Теперь учтём, что $1 - \tau_e \approx 2\sqrt{b}$, а $1 - \tau_{cr} = \frac{P_0}{\sigma_m} \left(1 - \frac{M_c}{M_0} \right)$ и получим критерий разрушения пласта магистральной трещиной в следующем виде

$$\sqrt{b} = \frac{P_0}{\sigma_m} \left(1 - \frac{M_c}{M_0} \right) \quad (4)$$

Этот критерий не учитывает, как выше сказано, разрушения трещин. Для учёта последнего фактора воспользуемся следующим соотношением из [4], определяющим $1 - \tau_{cr}$: $(1 - \tau_{cr}) \approx \frac{P_0}{\sigma_m} \left(\frac{1}{1 + a_m} - \frac{M_c}{M_0} \right)$. Параметр $a_m \equiv \frac{\sigma_m L_0}{Bz_0}$ связывает размеры трещины - начальную длину L_0 и начальное зияние z_0 с упругим модулем угля B и напряжением бокового распора.

Тогда получим следующий, основной, результат:

$$\sqrt{\frac{D_f}{vl}} < \frac{P_0}{\sigma_m} \left(\frac{1}{1 + a_m} - \frac{M_c}{M_0} \right) \quad (5)$$

При выполнении этого неравенства происходит разрыв, ассоциируемый с внезапным выбросом. Если же выполняется противоположное неравенство, то разрыва пласта не происходит. Очевидно, что для выполнения неравенства (5) необходимо выполнение критерия Гриффитса [4]:

$$\frac{1}{1 + a_m} > \frac{M_c}{M_0} \quad (6)$$

Таким образом, критерий спонтанного разрушения (5) включает в себя, как необходимое условие, выполнение критерия Гриффитса. Иначе, выполнение критерия Гриффитса необходимо, но, не достаточно для разрыва материала газонаполненной трещиной, нужно ещё чтобы фильтрация была слабой, в соответствии с (5).

Хотя графическое решение уравнения (2) на рис. 1 представлено для $b \ll 1$, критерий (5) остаётся справедливым для любых b , при условии, что D_e – коэффициент фильтрации в том месте, где находится трещина, совпадает с D_f . Если, например, $D_e \ll D_f$, то есть фильтрация в окрестности трещины затруднена, то сброс давления $p(t)$ внутри трещины запаздывает по отношению к сбросу давления газа $p_e(t)$ в массиве, окружающем трещину. В этом случае для определения степени опасности следует численно решать уравнение, описывающее постепенный сброс давления в полости трещины из [4], а затем (2). Если окажется, что существует решение (2) на интервале $0 < \tau < 1$, то это значит, что выброс произойдёт, если нет такого решения, то трещина лишь разбухнет, но разрыва не произойдёт.

На диаграмме, построенной в переменных v – скорость подвигания забоя и $V_f \equiv D_f/l$ – скорость фильтрации газа, указаны опасный и безопасный по выбросу секторы согласно полученному критерию (5) (рис. 2).

Материальные параметры, входящие в это неравенство, определяются лабораторными и натурными экспериментами, проведёнными в том числе ИФГП НАН Украины.

Таким образом, на основе сопоставления кинетики двух физических процессов, одновременно происходящих при разработке газонасыщенного угольного пласта от горного давления и фильтрации метана через уголь – установлены условия и параметры развязывания спонтанного разрушения призабойного участка газонасыщенного угольного пласта, сопровождаемого внезапным выбросом угля, породы и газа. Установленный критерий даёт возможность выбрать экономически целесообразную и, вместе с тем, безопасную по выбросу скорость отработки пласта с учётом его физико-химических и геотехнологических характеристик.



Рисунок 2 – Диаграмма схематического отображения критерия (5)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевелев, Г. А. Динамика выбросов угля, породы и газа / Г.А. Шевелев. – К: Наукова думка, 1989.
2. Zhi, S. The role of gas desorption on gas outbursts in underground mining of coal / S. Zhi, D. Elsworth // *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.* 2016. V. 2. P. 151-171.
3. Фельдман, Э.П. Роль разгрузки и фильтрации газа в процессе развития магистральных трещин в угольном пласте / Э.П. Фельдман, Н.А. Калугина, Т.Н. Мельник // *Прикладная механика и техническая физика.* – Новосибирск. – 2017. – Т. 58(1), – С. 155-164.
4. Фельдман, Э.П. Эволюция трещин в краевой части угольного пласта при его стационарной отработке / Э.П. Фельдман, Н.А. Калугина, О.В. Чеснокова // *Min. miner. depos.* 11(2): 41-45. <https://doi.org/10.15407/mining11.02.041>
5. Фельдман, Э.П. Изменение давления газа в окрестности магистральной трещины при равномерном движении забоя / Э.П. Фельдман, Н.А. Калугина, О.В. Чеснокова // *Физико-технические проблемы горного производства.* – Вып 19.

REFERENCES

1. Shevelev, G.A. (1989), *Dinamika vybrosov uglja, porody i gaza* [The dynamics of coal, rock and gas emissions], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.
2. Zhi, S. and Elsworth, D. (2016), The role of gas desorption on gas outbursts in underground mining of coal, *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.*, V. 2, p. 151-171.
3. Feldman, E.P., Kalugina, N.A. and Melnik, T.N. (2017), Rol razgruzki i filtratsii gaza v protsesse razvitiya magistralnykh treschin v ugolnom plaste [The role of gas unloading and filtration in the process of development of main cracks in a coal seam], *Applied mechanics and technical physics*, V. 58(1), p. 155-164.
4. Feldman, E.P., Kalugina, N.A. and Chesnokova, O.V. (2017), Evolyutsiya treschin v kraevoy chasti ugolnogo plasta pri ego stacionarnoy otrabotke. *Min. miner. depos.*, 11(2): 41-45, <https://doi.org/10.15407/mining11.02.041>.
5. Feldman, E.P., Kalugina, N.A. and Chesnokova, O.V. (2017), Change in gas pressure in the vicinity of the main crack with uniform movement of the face, *Physical and technical problems of mountain production*, V. 19.

Об авторах

Фельдман Эдуард Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела физики угля и горных пород Института физики горных процессов Национальной академии наук Украины (ИФГП НАН Украины), Днепр, Украина, feldman40@ukr.net

Калугина Надежда Александровна, доктор технических наук, старший научный сотрудник, учёный секретарь Института физики горных процессов Национальной академии наук Украины (ИФГП НАН Украины), Днепр, Украина, kalugina_n_a@ukr.net

Чеснокова Оксана Витальевна, научный сотрудник отдела физики угля и горных пород Института физики горных процессов Национальной академии наук Украины (ИФГП НАН Украины), Днепр, Украина, chesnokova0507@gmail.com

About the authors

Feldman Eduard Petrovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, State Scientific Worker, Department of Physics of Coal and Rock, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine, feldman40@ukr.net

Kalugina Nadiia Aleksandrivna, Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher, Scientific Secretary of the Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine, kalugi-na_n_a@ukr.net

Chesnokova Oksana Vitalievna, Scientific employee, Department of Physics of Coal and Rock, Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine, chesnokova0507@gmail.com

Анотація. На основі співставлення кінетики двох фізичних процесів, що одночасно відбуваються при розробці пластів газуватих родовищ – розвантаження вугільного пласта від гірського тиску і фільтрації метану крізь вугілля встановлений критерій розв'язування спонтанного руйнування привибійної ділянки газонасиченого вугільного пласта при стаціонарному посуванні вибою. При посуванні вибою напруги, що стискають тріщини, що містяться у вугільному пласті, поступово зменшуються (розвантаження пласта), що сприяє розвитку тріщин. Одночасно відбувається скидання тиску газу в порожнинах тріщин за рахунок його фільтрації у вироблений простір, що призупиняє розвиток тріщин. Тому результат еволюції тріщин залежить від того, який з цих двох конкуруючих процесів йде швидше. Використовуючи ідею «середнього» поля (mean field approximation), замість системи тріщин розглядається одна, магістральна тріщина, яка діє на параметри навколишнього «термостата». Знайдене співвідношення включає в себе, як необхідну умову, виконання критерію Грифїтса розриву матеріала газонаповненою тріщиною. Критерій дозволяє встановити роль фізичних параметрів вугільного пласта - гірського тиску, газового тиску, пружних модулів, тріщинуватості, сил зчеплення матеріалу, фільтрації метану у вугіллі і технологічних параметрів відпрацювання для безпечних за викидами умов розробки вугільного родовища. Побудована діаграма залежності швидкості посування вибою від швидкості фільтрації газу, на якій вказані небезпечний і безпечний по викиду сектори. Діаграма дозволяє вибрати економічно доцільну, і разом з тим безпечну швидкість відпрацювання пласта з урахуванням його фізико-хімічних властивостей і геотехнологічних умов відпрацювання. Матеріальні параметри, що входять в отриману нерівність, визначаються лабораторними і натурними експериментами, в тому числі і такими, що проведені в ІФГП НАН України.

Ключові слова: тріщина, вугільний пласт, газ, фільтрація, викид, тиск, розвантаження.

Abstract. On the basis of comparison of kinetics of two physical processes occurring simultaneously during development of gas-coal deposits – coal seam discharge from rock pressure and methane filtration in coal - a criterion was established for unleashing spontaneous destruction of bottom-hole section in the gas-saturated coal bed during stationary face driving.

During the face drivage, stresses, which compress cracks in the coal seam, gradually decrease (unloading of the seam) and, hence, contribute to further development of cracks. Simultaneously, gas pressure in the cavities of the cracks is released due to the gas escaping into the goaf, and development of the cracks stops. Therefore, result of the crack development depends on one of these two competing processes, which will develop faster. By using an idea of the «mean field approximation», it is possible to consider only one crack - main crack, which effects on parameters of the surrounding «thermostat» - instead of the system of cracks. The ratio found assumes, as necessary condition, usage of the Griffith criterion for material rupture by the gas-saturated crack. The criterion makes it possible to understand role of the coal seam physical parameters - rock pressure, gas pressure, elastic moduli, fracturing, adhesive forces of material, methane filtration in coal, and technological parameters of mining operations - in order to provide safety-by-gas-outburst conditions for coal deposit development.

A diagram of dependence between the face driving rate and gas filtration rate was constructed, which indicates hazardous and safety by gas outbursts sectors. The diagram allows to choose economically expedient, and, at the same time, safety rate of mining the coal seam with taking into account its physical and chemical properties and geotechnological working conditions. Parameters of material in the resulted equation were determined by laboratory and field experiments, including those carried out at the Institute for Physics of Mining Processes of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Keywords: main crack, coal bed, gas, filtration, pressure, discharge.

Статья поступила в редакцию 30.01.2018

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук С.П. Минеевым