

**Г.П. Стариков, Я.В. Шажко, А.В. Кравченко,
С.В. Шатохин, Л.Д. Ожегова, Т.В. Борщ**

ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ УГЛЯ, СВЯЗАННЫЕ С ФОРМИРОВАНИЕМ ВЫБРОСООПАСНЫХ ЗОН

Практика ведения очистных работ на газоносных угольных пластах свидетельствует о недостаточной надежности учета газового фактора при расчете допустимой нагрузки выемочных участков. В следствии этих недостатков увеличиваются частота и размеры аварий, главным причинам которых являются: нарушение проветривания; скопление метана; повышенное газовыделение. Наиболее непредсказуемый фактор, вызывающий в среднем до 25% аварий, – газовыделение из углей при нарушении термодинамического равновесия с окружением. Основными источниками поступления метана в призабойную часть выемочных участков являются обнаженный угольный массив, находящийся в условиях обобщенного растяжения; уголь, разрушенный добычными механизмами и распределенный в пределах очистного забоя, и приток метана из вмещающих пород и выработанного пространства. Поэтому актуально решение вопросов прогнозирования уровня и времени образования опасных концентраций метана в атмосфере выработки. В результате проведенных исследований разработан аналитический способ оценки уровня и времени формирования стационарных и опасных концентрации метана в объеме горной выработки, основанный на учете параметров массопереноса метана в угольном массиве и разрушенного угля и технологических параметров выемочных участков. Применение разработанного методического подхода позволит обосновать более достоверные способы определения допустимой нагрузки на очистной и подготовительный забой по газовой фактору и исключающих загазирования выработок и аварийных простоев участка.

Ключевые слова: массоперенос, метан, выработка, загазирование, фильтрация, фазовое состояние, уголь, забой.

Согласно существующих представлений [1–3] метан в угле содержится в газообразном состоянии в фильтрационном объеме, т.е. в трещинах, открытых порах и каналах, в адсорбированном состоянии и в виде твердого раствора в блоках угольного вещества, не нарушенных открытой пористостью. Истечение метана из фильтрационного объема в выработку

происходит путем фильтрации, описываемой законом Дарси. Одновременно метан, содержащийся в блоках угля и закрытых порах, поступает оттуда в фильтрационное пространство путем твердотельной диффузии. Тем самым реализуется диффузионно-фильтрационный механизм массопереноса метана в угле.

Использование указанной модели позволило установить [4], что для достаточно больших фракций угля (более 1 мм), а также для угольного пласта плотность потока метана через единицу площади обнаженной поверхности имеет место закономерность в виде:

$$j(t) = P_o \sqrt{\frac{\gamma_e D_f}{(\pi t)}}, \quad (1)$$

где $j(t)$ – плотность потока, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$; P_o – отношение пластового давления метана к атмосферному давлению; D_f – коэффициент фильтрации метана в угле, $\text{м}^2/\text{мин}$; t – время, отсчитываемое от момента обнажения поверхности угля, мин; γ_e – обобщенная пористость (безразмерная величина),

$$\gamma_e = \gamma + v(1 - \gamma)(1 - \gamma_o + \gamma_o/v);$$

γ_o – открытая пористость (безразмерная величина); γ – закрытая пористость (безразмерная величина); v – растворимость (безразмерная величина).

Входящие в структуру формулы два основополагающих параметра – P_o и D_f , как показывает опыт отработки угольных пластов напрямую связаны эпюрой горного давления, имеющей как правило три характерных участка [5] различного объемного нагружения и геомеханического состояния. Первый участок находится в условиях обобщенного сжатия, второй – обобщенного сдвига и третий участок – обобщенного растяжения [6].

По своей структуре третий участок включает зону отжима, глубина которой для углей средне стадии метаморфизма, как правило, не превышает 1–1,5 м, а давление метана в среднем снижается до атмосферного.

В остальной части третьего участка (переходная часть эпюры на границе с зоной отжима) из-за снижения проницаемости угольного массива вследствие роста горного давления сохраняет высокую метаноемкость угля. Из работы [7] следует, что давление газа в этой части эпюры может составить

$$P - P_{nl} = \left[\frac{3P_{nl}}{4G} \right] (\sigma_m - P_{nl}), \quad (2)$$

где G – модуль сдвига угля; σ_m – максимальное горное давление.

Оценка P для глубин залегания пологих угольных пластов $H = 800 \dots 1300$ м свидетельствует о том, что его значение может на 15–55 % превышать пластовое давление. Согласно работе [8] это приведет к возрастанию фильтрационной составляющей коэффициента массопереноса метана в угле, имеющей вид

$$D_f = \left[\frac{K e^{-(\sigma_m/\sigma_c)}}{\mu} \right] P_{пл}, \quad (3)$$

где K – коэффициент проницаемости угля, m^2/c ; μ – динамическая вязкость метана, $МПа \cdot c$; σ_c – прочность угля на одноосное сжатие, $МПа$; $P_{пл}$ – давление метана в нетронутом массиве, $МПа$.

Анализ формулы (3) показывает, что фильтрационная составляющая процесса десорбции метана из угля – наиболее информативный показатель, учитывающий одновременно внешнее и внутреннее состояние системы уголь-газ.

Вхождение в переходную зону с высокой метаноемкостью угля интенсифицирует процесс массопереноса метана как с поверхности обнажаемого массива, так и разрушенного угля. Вследствие этого согласно работе [9] суммарная интенсивность метановыделения составит

$$m(t) = \frac{P_{пл}}{P_a B} \sqrt{\frac{\gamma D_f}{(\pi t + T)}} + \left[\frac{12 P_{пл} v_n}{(P_a B r_{np})} \right] \left(\sqrt{\frac{\gamma D_f l}{(\pi v_k)}} + \sqrt{\frac{\gamma D_f L_k}{(\pi v_l)}} \right) \quad (4)$$

где $P_{пл}$ – давление метана в угольном пласте; определяется с помощью шахтного измерителя массопереноса метана ДС-03, $МПа$; P_a – атмосферное давление, $МПа$; B – ширина рабочего пространства очистной выработки, $м$; γ – пористость угля, %; D_f – фильтрационная составляющая коэффициента массопереноса метана в угле, m^2/c ; $t = 2 \dots 2,5$ мин – время формирования стационарного потока метана из обнаженной поверхности угольного забоя; v_n , v_k и v_l – скорость среднесуточная подвигания очистного забоя, скорость движения скребкового конвейера и движения ленты ленточного конвейера, $м/с$; r_{np} – размер фракции угля, $м$; l – длина лавы, $м$; L_k – длина ленточного конвейера, $м$.

При этом концентрацию метана и время ее формирования в объеме очистной выработки определяют по формулам

$$C_s = \frac{m(t)}{[m(t) + q]}; \quad (5)$$

$$t_{kp} = \frac{C_{дон}}{m(t)}, \quad (6)$$

где $C_{дон}$ – допустимая концентрация метана по ДНАОП [10], %; q – интенсивность проветривания 1 м³ объема выработки, мин⁻¹.

Из анализа представленной методологии следует, что при высокой интенсивности метановыделения (порядка 10⁻² мин⁻¹), которое наблюдается в лавах, обрабатывающих пласты с природной газонасыщенностью $Q > 20$ м³/т с.б.м., предельная концентрация метана, как правило, превышает допустимую с минимальным временем образования.

Чтобы исключить такую ситуацию, необходимо для каждого конкретного забоя установить оптимальный темп работы t_{max} добычного оборудования. При этом для определения коэффициента фильтрации метана в угле и его пористости у проводят измерения в очистном забое прибором ДС-03 [11].

Исходя из геомеханического состояния краевой части пласта граница зоны Z , разграничивающая зону отжима и локальную область газонасыщенного угольного массива, перемещается по простиранию пласта согласно закону

$$Z = \sqrt{\frac{D_f t_{max}}{(\pi v)}}, \quad (7)$$

В то же время очистной забой подвигается по простиранию в соответствии с линейным законом $y = v_n t_{max}$.

Условие, при котором зона отжима пересечет границу с повышенными параметрами массопереноса метана в угле, определяется из уравнения $Z = y$. В этом случае

$$t_{max} = \frac{D_f}{(\pi \gamma v_n^2)}, \quad (8)$$

При $t < t_{max}$ добыча угля практически не влияет на скорость газовыделения из пласта (но, конечно, увеличивает газовыделение из отбитого угля); если же $t > t_{max}$, то газовый поток с единицы площади обнаженной поверхности стабилизируется на высоком уровне:

$$j_{max} = P_0 \gamma v_n, \quad (9)$$

где P_0 – плотность метана, г/см³.

Таким образом, если $t > t_{\max}$, то во время добычи угля газоотдача из пласта значительно увеличивается. В связи с этим время t_{\max} можно назвать максимальным временем безопасной непрерывной добычи угля.

Из формулы (8) видно, что при большом коэффициенте фильтрации, т.е. для высоконарушенных углей, время t_{\max} может увеличиваться до суток, поэтому добыча угля даже с высокой скоростью подвигания забоя (10 м/сут и более) реально не повлияет на газоотдачу из пласта.

Выводы

Разработаны научные основы оценки времени газоотдачи из разрушенного угольного массива, учитывающей закономерности изменения фильтрационной составляющей процесса массопереноса метана в поровой структуре угля и скорость подвигания линии очистного забоя. Применение разработанного методического подхода позволит сформировать новые правила определения допустимой нагрузки на очистной забой по газовому фактору и создать новую технологию отработки высокогазоносных угольных пластов с исключением возможности газирования выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт.* — К.: Основа, 1994.
2. *Алексеев А. Д., Фельдман Э. П., Василенко Т. А. и др.* Диффузионно-фильтрационная модель выхода метана па угольного пласта // Журнал технической физики. — 2007. — Т. 77. — Вып. 4. — С. 65–74.
3. *Каркашадзе Г. Г., Алексеев А. Д., Стариков Г. П. и др.* Совершенствование методики расчета нагрузки на очистной забой с учетом давления метана в угольном пласте // Горный журнал. — 2009. — № 4. — С. 47–50.
4. *Фельдман Э. П., Василенко Т. А., Калугина Н. А.* Истечение метана из угля в замкнутый резервуар: роль явлений диффузии и фильтрации // Физика и техника высоких давлений. — 2006. — Т. 16. — № 2. — С. 99–114.
5. *Петухов И. М., Линьков Л. М., Сидоров В. С. и др.* Расчетные методы в механике горных ударов и выбросов: справочное пособие. — М.: Недра, 1992. — 256 с.
6. *Докукин А. В., Чирков С. Е., Норель Б. К.* Моделирование предельно-напряженного состояния угольных пластов. — М.: Наука, 1981. — 140 с.
7. *Фельдман Э. П., Стариков Г. П., Калугина Н. А., Навка Е. А.* Перераспределение метана в призабойной зоне угольного пласта // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. — 2013. — № 13. — С. 85–99.

8. *Стариков Г. П., Завражин В. В., Худолей О. Г. и др.* Геофильтрационная оценка параметров зоны разгрузки призабойной части угольных пластов // Физико-технические проблемы горного производства. – 2013. – Вып. 16. – С. 152–162.

9. *Гриньов В. Г., Фельдман Е. П., Стариков Г. П., Калугіна Н. О., Мамлеев Ш. В., Прокоф'єва Л. М., Кольчик І. Є.* Патент 105870 Україна, МПК (2014.01) E21F 5/00. Спосіб визначення допустимого навантаження на очисний вибій; заявник і патентовласник ІФГП НАН України. № а 201307863; заявл. 20.06.13; опубл. 25.06.14, Бюл. № 12

10. *Безопасное* ведение работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям: ДНАОП І.1.30–І.ХХ.04. – К., 2004. – 195 с.

11. *Пилюгин В. И., Стариков Г. П.* Совершенствование нормативной базы в области проектирования проветривания и дегазации очистных забоев // Уголь Украины. – 2013. – № 8. – С. 40–43. **ГІАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Стариков Геннадий Петрович*¹ – доктор технических наук, профессор, директор,

*Шажко Ярослав Витальевич*¹ – кандидат технических наук, зам. директора по научной работе, e-mail: syarilo@mail.ru,

*Кравченко Александр Викторович*¹ – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела прогноза и борьбы с ГДЯ в шахтах,

*Шатохин Сергей Васильевич*¹ – инженер отдела прогноза и борьбы с ГДЯ в шахтах,

*Ожегова Лариса Дмитриевна*¹ – ученный секретарь,

*Борц Татьяна Васильевна*¹ – научный сотрудник отдела физики сорбционных процессов,

¹ Институт физики горных процессов, Министерство образования и науки Донецкой Народной Республики.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 11, pp. 222–224.

UDC 622.831:
537.86

G.P. Starikov

FEATURES OF COAL DESTRUCTION ASSOCIATED WITH THE FORMATION OF OUTBURST ZONES

The practice of doing cleaning work on gas-bearing coal seams indicate a lack of reliability of the account of gas factor when calculating the allowable load excavation sites. The consequence of these drawbacks is the increased frequency and size of accidents. The main causes of these accidents include: impaired ventilation; accumulation of methane; increased gas emission and the most unpredictable factor of on average up to 25 % of accidents, is the out gassing of coal in violation of thermodynamic equilibrium with the environment. Given that the main sources of methane in the bottom part of the excavation sites are naked coal mass under conditions of a generalized stretching, coal mining destroyed the mechanisms and distributed within the stope, and the influx of methane from the host rocks and mine, high important issues of forecasting level and time of formation of dangerous concentrations of methane in the atmosphere of the production. The use of existing regulations to calculate the amount of air necessary for ventilation of working faces, is based on an empirical approach

that does not reflect the physical properties of the coal seam and technological parameters of its recesses.

As a result of research developed analytical method of evaluation of level and time of formation of stationary and dangerous concentrations of methane in mine working based on the parameters of mass transfer of methane in coal array and destroyed the coal and process parameters excavation sites.

Application of the developed methodological approach allows to prove more reliable ways of determining the permissible loading on a clearing and preparatory face on the gas factor and eliminating exaggeration of gas workings and emergency downtime of the site.

Key words: mass transfer, methane, mine, exaggeration of gas, filtering, phase state, coal, mine.

AUTHORS

*Starikov G.P.*¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director,
*Shazhko Ya.V.*¹, Candidate of Technical Sciences,
Deputy Director on scientific work», e-mail: syarilo@mail.ru,
*Kravchenko A.V.*¹, Candidate of Technical Sciences, Researcher,
Department of Projection and Control Gas Dynamic Phenomena in Mines,
*Shatokhin S.V.*¹, Engineer, Researcher,
Department of Projection and Control Gas Dynamic Phenomena in Mines,
*Ozhegova L.D.*¹, Scientific Secretary,
*Borsch T.V.*¹, Researcher, Department of Physics of Sorption Processes,
¹ State institution «Institute of physics of mining processes»,
Ministry of Education and Science of the Donetsk National Republic, 83114, Donetsk.

REFERENCES

1. *Rukovodstvo po proektirovaniyu ventilyatsii ugol'nykh shakht* (Design Guide ventilation of coal mines), Kiev, Osnova, 1994.
2. Alekseev A. D., Fel'dman E. P., Vasilenko T.A. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2007, vol. 77. Vyp. 4, pp. 65–74.
3. Karkashadze G.G., Alekseev A. D., Starikov G. P. *Gornyy zhurnal*. 2009, no 4, pp. 47–50.
4. Fel'dman E. P., Vasilenko T.A., Kalugina H.A. *Fizika i tekhnika vysokikh davleniy*. 2006, vol. 16, no 2, pp. 99–114.
5. Petukhov I. M., Lin'kov L. M., Sidorov V.S. *Raschetnye metody v mekhanike gornykh udarov i vybrosov*: spravochnoe posobie (Calculation methods in mechanics of rock bursts and releases: Right, Reference aid), Moscow, Nedra, 1992, 256 p.
6. Dokukin A. V., Chirkov S. E., Norel' B. K. *Modelirovanie predel'no-napryazhennogo sostoyaniya ugol'nykh plastov* (Simulation of maximum stress state of coal seams), Moscow, Nauka, 1981, 140 p.
7. Fel'dman E. P., Starikov G. P., Kalugina N. A., Navka E. A. *Naukovi pratsi UkrNDMI HAH Ukraini*. 2013, no 13, pp. 85–99.
8. Starikov G. P., Zavrazhin V.V., Khudoley O. G. *Fiziko-tekhnicheskie problemy gornogo proizvodstva*. 2013, issue 16, pp. 152–162.
9. G`rin'ov V.G., Fel'dman E. P., Starikov G. P., Kalugina N.O., Mamleev Sh.V., Prokof'eva L. M., Kol'chik I. E. *Patent 105870 Ukraina, MPK (2014.01) E21F 5/00*, 25.06.14.
10. *Bezopasnoe vedenie rabot na plastakh, sklonykh k gazodinamicheskim yavleniyam: DNAOP 1.1.30–1.XX.04* (Safe operations in seams prone to gas-dynamic phenomena: State register of legal acts on safety 1.1.30–1.XX.04), Kiev, 2004, 195 p.
11. Pilyugin V.I., Starikov G. P. *Ugol' Ukrainy*. 2013, no 8, pp. 40–43.