

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГАЗОНОСНОСТИ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ПАРЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ МЕТАНА, ВЫХОДЯЩЕГО ИЗ ФРАКЦИЙ УГЛЯ В НАКОПИТЕЛЬНЫЙ СОСУД

Э.П. Фельдман, Н.А. Калугина, Институт физики горных процессов НАН Украины, Украина

Получены формулы для определения количества метана в призабойной части угольного массива на основе определения его объема, десорбированного в герметичный накопительный сосуд.

Разработка надежных экспресс - методов и технических средств для определения метаноносности непосредственно в призабойной зоне угольных пластов для повышения достоверности прогноза безопасных условий труда по газовому фактору – актуальная научная и социальная задача. Для ее решения разрабатываются теоретические модели, проводятся шахтные эксперименты, лабораторные сорбционные исследования, использующие закрытые вакуумированные емкости, куда помещают изучаемые образцы угля. Эти исследования призваны определить плотность (и давление) метана в резервуаре при равновесии, за какое время устанавливается равновесие, если в резервуаре был воздух, то за какое время достигается взрывоопасная концентрация метана.

В ИФГП НАН Украины разработан прибор [1], который позволяет непосредственно в шахтных условиях измерять давление метана, вышедшего из угольных проб, выбуренных из пласта и помещенных в герметичную накопительную кювету. Однако способ определения метаноносности угольного пласта в месте извлечения проб требует предварительного лабораторного исследования по построению так называемого десорбционного паспорта этого конкретного угольного пласта [2,3]. Получение простых расчетных формул для определения давления и количества метана, изложенное ниже, может существенно упростить и ускорить задачу.

В [4] была изучена истечение метана из угля в замкнутый резервуар в условиях совместного протекания двух физических явлений – фильтрации и диффузии. Предполагалось, что метан в угольном веществе находится: в свободном газообразном состоянии в фильтрационном объеме угля, т.е. в системе пор, трещин и каналов, сообщающихся с внешней поверхностью угольного пласта; в адсорбционной пленке на поверхности угольного вещества; в виде твердого раствора в объеме блоков. В последнем случае необходимо уточнить, что внутри каждого блока имеется система закрытых пор (не сообщающихся каналами с фильтрационным объемом), в этих порах метан находится как в газообразном состоянии, так и в адсорбированном – на поверхности пор. Особенность явления истечения метана из угольного вещества состоит в наложении двух процессов массопереноса – фильтрации газа через систему открытых каналов, трещин и пор; диффузии метана из твердого раствора (блоков) в фильтрационный объем.

Если отторгнутые от массива куски угля поместить в замкнутый резервуар, то сначала газ из фильтрационного объема устремляется в не занятый углем объем V_f , давление газа внутри гранулы снижается, благодаря чему стартует процесс диффузионного массопереноса сорбированного метана из блока в фильтрационный объем. Происходит фильтрация газа с одновременной подпиткой фильтрационного объема метаном, растворенным в блоках. Истечение метана из этих кусков будет продолжаться до тех пор, пока давление метана в резервуаре не сравняется с его давлением в трещиновато-пористой системе угля.

Уголь, помещенный в сосуд, состоит из отдельных кусков (гранул), отличающихся друг от друга размером. Очевидно, что время выхода метана из отдельной гранулы зависит от ее размера. Поэтому в общем случае характерное время выхода метана из всей его массы зависит от распределения гранул по размерам. В рассматриваемой модели для упрощения будем считать, что все куски угля являются шарами одинакового радиуса L (рис.1). Кроме того, предполагаем, что все блоки представляют собой шары одинакового радиуса R .

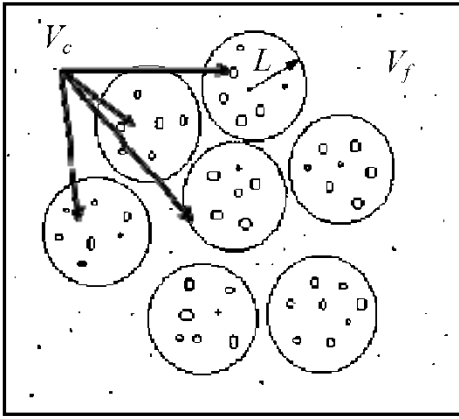


Рис. 1. Схематическое изображение угольного вещества, находящегося в замкнутом объеме

быстрее фильтрации ($t_f \gg t_d$) и теория [4] дает следующую формулу для изменения плотности метана в порах угля к моменту времени t :

$$\rho_0 - \rho(t) = \frac{\rho_0 \sqrt{D_f t}}{L \sqrt{\gamma}}, \quad (1)$$

где $\rho(t)$ – плотность метана в порах к моменту времени t ; ρ_0 – исходная плотность метана, связанная с пластовым давлением $P_{пл}$ уравнением состояния идеального газа $P_{пл} = \rho_0 T$, T – абсолютная температура в энергетических единицах; полная пористость $\gamma = \gamma_0 + \nu(1 - \lambda_0)(1 - \gamma_p + \frac{\gamma_p}{\nu})$, где γ_0 – открытая пористость, γ_p – закрытая пористость, ν – растворимость метана в угольном веществе.

Согласно (1) выход метана из гранул угля происходит по корневому закону, который сменяется экспоненциальным приближением к равновесию в момент t_e , когда $\frac{\sqrt{D_f t_e}}{L \sqrt{\gamma}}$ становится величиной порядка единицы, т.е.

$$t_e \sim \frac{L^2 \gamma}{D_f}. \quad (2)$$

Поскольку метан находится только в порах, то количество q_t метана, вышедшего из угля, пропорционально пористости γ и, разумеется, суммарному объему гранул V_c :

$$q_t = \gamma V_c \frac{\rho_0 \sqrt{D_f t}}{L \sqrt{\gamma}} = \sqrt{\gamma} V_c \frac{\rho_0 \sqrt{D_f t}}{L}. \quad (3)$$

В формуле (3) ρ_0 измеряется в m^{-3} , а величина q – безразмерна (число молекул). Уголь отторгается от массива в момент времени $t=0$, принимаемый за начальный. В накопительный сосуд уголь загружается через время t_0 . Поэтому в этот сосуд попадает только тот метан, который вышел из угля на промежутке от t_0 до t , т.е.

$$q = \frac{\sqrt{\gamma} V_c \rho_0 \sqrt{D_f}}{L} (\sqrt{t} - \sqrt{t_0}). \quad (4)$$

На эксперименте время τ отсчитывают от момента герметизации накопительного сосуда, т.е. $t=t_0+\tau$. Поэтому формула (4) переписывается так:

$$q = \frac{\sqrt{\gamma} V_c \rho_0 \sqrt{D_f}}{L} (\sqrt{t + \tau} - \sqrt{t_0}). \quad (5)$$

Если разделить q на объем V накопительного сосуда, то получим плотность метана в этом сосуде; если затем эту величину умножить на температуру, то получим, согласно уравнению состояния, давление P газа в накопительном сосуде. Имея в виду также (4) и считая температуру газа в угле равной его температуре в накопительном сосуде, находим, что

$$P = \frac{\sqrt{\gamma} V_c P_{nl} \sqrt{D_f}}{VL} \left(1 - \sqrt{\frac{t_0}{t_0 + \tau}} \right) \quad (6)$$

или, в несколько иной форме,

$$P = P_{nl} \frac{V_c}{V} \frac{\sqrt{\gamma D_f (\tau + t_0)}}{L} \left(1 - \sqrt{\frac{t_0}{t_0 + \tau}} \right). \quad (7)$$

Эта формула дает связь между экспериментально измеряемым парциальным давлением метана в накопительном сосуде к моменту времени τ и такими параметрами, как пластовое давление метана P_{nl} , коэффициент фильтрации D_f , пористость γ , размер фракции L , и время задержки t_0 .

К моменту $t_e = t_0 + \tau_e$ определяемому из (2), давление метана становится равным

$$P_e \approx P_{nl} \gamma \frac{V_c}{V} \left(1 - \sqrt{\frac{t_0}{t_0 + \tau_e}} \right). \quad (8)$$

Что касается зависимости $P(t)$, то, согласно (6) при малых τ , когда $\tau \ll t_0$ – эта зависимость линейна, а при $\tau \gg t_0$ зависимость корневая (рис.2). Затем, при $\tau \geq \tau_e$, давление практически стабилизируется на уровне P_e , определяемом из соотношения (8).

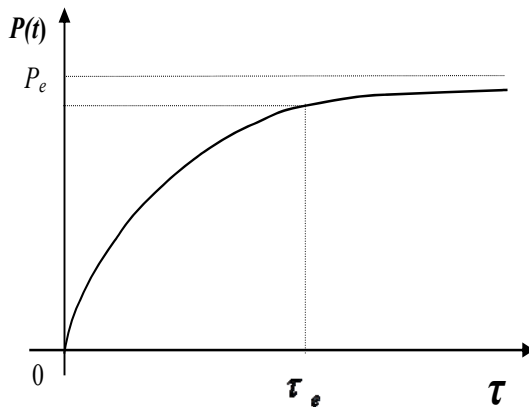


Рис.2. Характер изменения давления метана в накопительном сосуде.

Так как на эксперименте можно достаточно надежно зафиксировать величины τ_e и P_e , то, зная пористость γ , можно определить пластовое давление P_{nl} :

$$P_{nl} \approx \frac{P_e V}{\gamma V_c \left(1 - \sqrt{\frac{t_0}{t_0 + \tau_e}} \right)}. \quad (9)$$

Тогда метаноносность исследуемого участка, из которого извлечены фрагменты угольного массива, вычисляется следующим образом:

$$Q = \frac{\gamma P_{nl}}{\rho_c P_a}. \quad (10)$$

Например, при объеме накопительной емкости $V=400 \text{ см}^3$, объеме угольных фракций размером 0,4-0,5 мм, помещенных в эту емкость, $V_c=12 \text{ см}^3$, плотности угля $\rho=1,4 \text{ т/м}^3$, давлении равновесия $P=9500 \text{ Па}$, атмосферном $P_a=10^5 \text{ Па}$, $t_0=5 \text{ мин}$, получаем метаноносность $Q=4,5 \text{ м}^3/\text{т}$, пластовое давление метана в исследуемом участке $P_{nl}=2,1 \text{ МПа}$. Полученный оценочный расчет имеет хорошую сходимость с результатами лабораторных исследований.

Из соотношения $t_0 + \tau_e \approx \frac{L^2 \gamma}{D_f}$, следующего из (2), можно дать оценку коэффициента фильтрации:

$$D_f \approx \frac{L^2 \gamma}{t_0 + \tau_e}. \quad (11)$$

Знание величины коэффициента массопереноса может быть важно для прогнозирования скорости выхода метана из угольного пласта.

Список литературы.

1. Пат. № 96884 Україна, МПК (2011.01) E21 F5/00. Пристрій для виміру тиску й газоємності вугільного пласта / Алексєєв А.Д., Васильковський В.О., Старіков Г.П., Брюм В.З., Грінюв В.Г., Шажко Я.В., Прокоф'єва Л.М.; власник Інститут фізики гірничих процесів НАН України. – заявл. 06.12.2010 ; опубл. 25.06.2011, Бюл. №12.
2. Алексєєв А. Д. Экспресс-метод и десорбметр для определения газового давления и содержания метана в угольном пласте / А. Д. Алексєєв, В. А. Васильковський, А. Н. Молчанов, А. И. Спужакін, Г. П. Стариков // Наука та інновації. – 2009. – Т. 5, № 6. – С. 48-51.
3. Пат. № 89740 Україна, МПК (2009) E21F7/00. Спосіб визначення тиску й метаноносності вугільного пласта / Алексєєв А.Д., Васильковський В.О., Спужакін А.І., Старіков Г.П., Брюм В.З.; власник Інститут фізики гірничих процесів НАН України. - № а 2009 02578; заявл. 23.03.2009, опубл. 25.02.2010, Бюл. № 4.
4. Фельдман Э.П. Истечение метана из угля в замкнутый резервуар: роль явлений диффузии и фильтрации. /Э.П. Фельдман, Т.А. Василенко, Н.А. Калугина // ФТВД. – 2006. – т. 16, № 2. – С.92–107.