

PACS: 62.20.F, 91.10.Kg

Г.П. Стариков, Я.В. Шажко, О.Г. Худолей, А.В. Кравченко

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И ГАЗОНОСНОСТИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Институт физики горных процессов

Статья поступила в редакцию 11 июня 2018 года

Описан новый подход для определения давления и количества метана в угольном пласте, основанный на использовании расчетных формул, учитывающих кинетику десорбции метана из угольных фракций, что существенно упрощает оценку газоносности угольного пласта в шахтных условиях.

Ключевые слова: метан, газоносность, десорбция, эффективная диффузия, массоперенос

Для повышения безопасности условий отработки высокогазоносных и выбросоопасных пластов необходим постоянный мониторинг фазового состояния и количества метана в призабойной части угольного массива. Одним из возможных направлений решения этой проблемы является разработка экспресс-методов и технических средств для определения давления и газоносности угля непосредственно в пластовых горных выработках.

В Институте физики горных процессов разработан прибор [1], позволяющий непосредственно в шахтных условиях измерять давление и количество метана, вышедшего из угольных проб, выбуренных из пласта и помещенных в герметичную накопительную кювету. При этом для определения метаноносности угольного пласта в месте извлечения проб необходимо проведение предварительных лабораторных исследований, связанных с созданием десорбционного паспорта конкретного угольного пласта, требующего высокоточных средств измерения [2].

В работах [3,4] было изучено истечение метана из угля в замкнутый резервуар в условиях совместного протекания фильтрации и диффузии в предположении, что метан в угольном веществе находится в двух состояниях: 1) свободном газообразном – в фильтрационном объеме угля в порах и трещинах, сообщающихся с внешней поверхностью угольного пласта; 2) сорбированном – в микроблоках угольного вещества [5]. Внутренняя структура микроблоков имеет систему закрытых пор (не сообщающихся с каналами фильтрационного объема). На поверхности этих пор метан находится в газообразном и адсорбированном состояниях.

Если отторгнутые от массива фракции угля (гранулы) поместить в накопительную камеру, то оставшийся в них газ устремляется в не занятый углем объем камеры $V_{acc.ch}$. При этом давление внутри гранулы снижается, и начинается процесс диффузионного массопереноса сорбированного метана из микроблоков в фильтрационный объем. Происходит фильтрация газа с одновременной подпиткой фильтрационного объема метаном из закрытых пор микроблоков. Истечение метана из этих фракций продолжается до тех пор, пока не сравняются величины его давления в резервуаре и в трещиновато-пористой системе угля.

В представленной на рис. 1 модели фракции угля и микроблоков показаны шарообразными гранулами радиусами соответственно R_{fr} и R_m . Длительность процесса массопереноса метана из угля условно включает время фильтрации $t_f = R_{fr}/D_f$ (D_f – коэффициент фильтрации) и время диффузии газа из микроблока в фильтрационный объем $t_d = R_m^2/D_d$ (D_d – коэффициент диффузии).

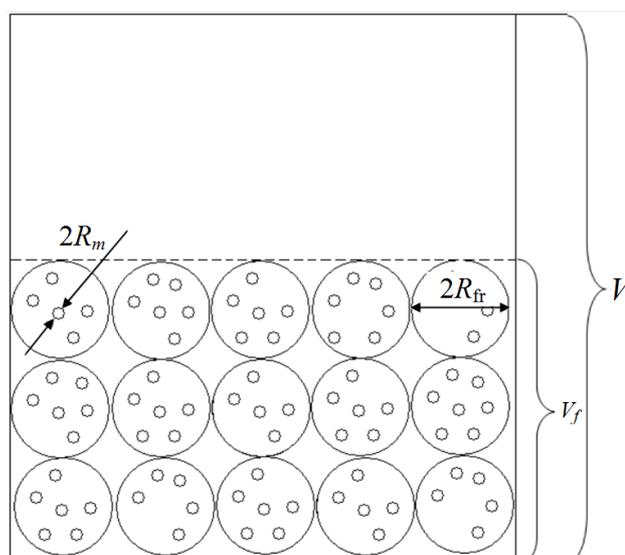


Рис. 1. Схематическое изображение угольного вещества, находящегося в замкнутом объеме

Для репрезентативных значений параметров фильтрации и диффузии $D_f \sim 10^{-7}$ м/с, $D_d \sim 10^{-15}$ м/с, $R_m \sim 10^{-6}$ м и $R_{fr} \sim 10^{-3}$ м время фильтрации составит десятки секунд, а время диффузии – несколько десятков минут, т.е. фильтрация идет значительно быстрее диффузии ($t_f \gg t_d$). Изменение плотности метана ρ в порах угля к моменту времени t можно определить по формуле [3]:

$$\rho_0 - \rho(t) = \frac{\rho_0 \sqrt{D_f t}}{R_{fr} \sqrt{\gamma}}. \quad (1)$$

Здесь ρ_0 – исходная плотность метана, связанная с пластовым давлением P_b уравнением состояния идеального газа $P_b = \rho_0 T$, T – абсолютная температура в энергетических единицах; $\gamma = \gamma_0 + v(1 - \gamma_0) \left(1 - \gamma_p + \frac{\gamma_{cl}}{v} \right)$ – полная пористость угля, где γ_0 , γ_{cl} – соответственно открытая и закрытая пористость, v – растворимость метана в угольном веществе.

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

$$t = \frac{R_m^2 \gamma}{D_f}. \quad (2)$$

Поскольку метан находится только в порах, количество q метана, вышедшего из угля, пропорционально пористости γ и суммарному объему гранул V_m :

$$q_t = \gamma V_{acc.ch} \frac{\rho_0 \sqrt{D_f t}}{R_{fr} \sqrt{\gamma}} = \sqrt{\gamma} V_{acc.ch} \frac{\rho_0 \sqrt{D_f t}}{R_{fr}}. \quad (3)$$

Уголь отторгается от массива в момент времени $t = 0$, принимаемый за начальный. В накопительную камеру уголь загружается через время t_0 , поэтому в нее попадает только тот метан, который вышел из угля на промежутке от t_0 до t :

$$q = \gamma V_{acc.ch} \frac{\sqrt{\gamma} V_{acc.ch} \rho_0 \sqrt{D_f}}{R_{fr}} (\sqrt{t} - \sqrt{t_0}). \quad (4)$$

На эксперименте время τ отсчитывают от момента герметизации накопительной камеры $t = t_0 + \tau$, поэтому формулу (4) преобразуем к виду

$$q = \frac{\sqrt{\gamma} V_{acc.ch} \rho_0 \sqrt{D_f}}{R_{fr}} (\sqrt{t + \tau} - \sqrt{t_0}). \quad (5)$$

Если разделить q на объем накопительной камеры $V_{acc.ch}$, то получим плотность метана в этой камере. Умножив данную величину на температуру, согласно уравнению состояния получим давление газа в накопительной камере $P_{acc.ch}$. Учитывая также (4) и считая температуру газа в угле равной его температуре в накопительной камере, находим

$$P_b = \frac{P_{acc.ch} V_{acc.ch} R_{fr}}{\sqrt{\gamma D_f (t_0 + \tau)} V_{acc.ch} \sqrt{\frac{t_0}{t_0 + \tau}}}. \quad (6)$$

Эта формула демонстрирует связь между экспериментально измеренным парциальным давлением метана к моменту времени стабилизации давления в накопительной камере τ и давлением метана в угольном пласте.

Метаноносность исследуемого участка Q_{calc} , из которого извлечены фрагменты угольного массива (буровой штыб), вычисляется по формуле

$$Q_{\text{calc}} = \frac{\gamma P_b}{\rho_m P}, \quad (7)$$

где ρ_m – плотность угля, P – атмосферное давление.

Для оценки достоверности методологии прогноза давления метана в угле и его газоносности был проведен цикл исследований по насыщению угольных образцов метаном при давлении $P_{\text{sat}} = 10$ МПа и измерений параметров десорбции в замкнутый объем. Критерием достоверности измерений служило совпадение фактического давления насыщения угольных фракций с расчетным значением, определяемым по формуле (6).

Методика измерений включала подготовку угольных фракций размером $R_1 = 0.4\text{--}0.6$ mm и $R_2 = 1.0\text{--}1.6$ mm массой до 10 g каждая. Обе фракции помещали в контейнер высокого давления, вакуумировали в течение 30 min и насыщали метаном на протяжении 10 d. После насыщения фракции извлекали и помещали в кюветы измерительного прибора ДС-03. Время извлечения фракции и герметизации накопительных кюветов составляло 4–5 min. Процесс десорбции метана из угля, помещенного в кюветы, фиксировали по нарастанию в них давления.

На рис. 2 приведены зависимости $P = f(t)$ для двух типоразмеров угольных фракций, отобранных с пласта l_1 7-го конвейерного штрека ПК 84 шахты им. А.Ф. Засядько. Установленные зависимости использовали для расчета пористости угля γ и коэффициента фильтрационной составляющей D_f .

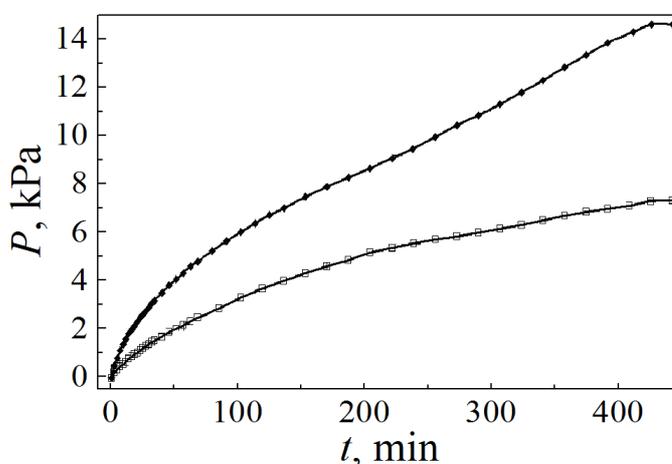


Рис. 2. Зависимость $P = f(t)$, характеризующая процесс десорбции метана из угольных фракций размерами 0.4–0.5 mm (●) и 1.0–1.6 mm (□) в течение $t = 360$ min

Для определения коэффициента фильтрации метана в угле используют зависимость $D_{\text{eff}} = f(t)$, которую раскладывают на составляющие D_f и D_d с использованием интерполирующей функции вида

$$y = a \exp(-x/b) + c \exp(-x/d),$$

где $a = D_f$, $c = D_d$, $x = t$ – время замера по данным ДС-03.

Расчет пористости угля и коэффициента эффективной диффузии производили по формулам

$$\gamma = \frac{P_{f1} V_{\text{acc.ch}}}{P_{\text{sut}} V \left[1 - \sqrt{\frac{t_0}{t_0 + \tau}} \right]}, \quad (8)$$

$$D_{\text{eff}} = R_2^2 \left(1 - \frac{P_{1i}}{P_{fi}} \right) - R_1^2 \ln \left(1 - \frac{P_{2i}}{P_{fi}} \right) \left[6t \ln \left(1 - \frac{P_{1i}}{P_{fi}} \right) \left(1 - \frac{P_{2i}}{P_{fi}} \right)^{-1} \right]^{-1}, \quad (9)$$

где P_{1i} , P_{2i} , P_{fi} – начальные и конечные текущие значения давления в кюветках двух типоразмеров угольных фракций.

Зависимость коэффициента эффективной диффузии от времени приведена на рис. 3.

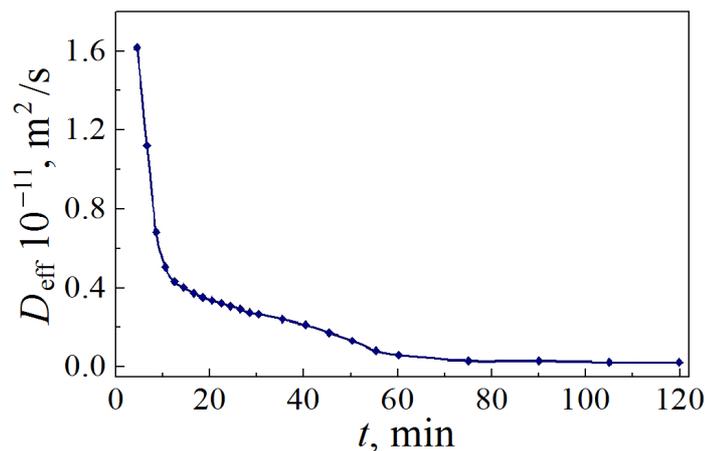


Рис. 3. Кинетика изменения коэффициента эффективной диффузии метана в угле во времени

Результаты расчетов приведены в таблице. Представленные данные демонстрируют достаточную сходимость фактических и расчетных значений как давления, так и газоносности угольного пласта.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что за период 1.5–2.0 min массоперенос по механизму фильтрации сменяется диффузией. Это подтверждает обоснованность используемой теоретической модели.

Таблица

Результаты измерения и определения давления и газоносности угольных образцов

Угольные фракции	V_m	$V_{acc.ch}$	γ	t_0	τ	$D_f, 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$P_{acc.ch}, 10^3 \text{ Pa}$	P_{sut}	P_{calc}	Q_{f_1}	Q_{calc_1}
	10^{-6} m^3			min							
$R_1 - 0.45 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ $R_2 - 1.35 \cdot 10^{-3} \text{ m}$	4.5	400	0.16	5	360	5.6	15.9	10.0	9.2	13.5	12.8

В целом полученные результаты дают основание для применения разработанной методологии при измерении метаноносности угольных пластов в шахтных условиях с помощью прибора ДС-03 без привлечения десорбционных паспортов.

1. Пат. № 96884 UA, МПК (2011.01) E21 F5/00. Пристрій для виміру тиску й газоемності вугільного пласта, А.Д. Алексеев, В.О. Васильковский, Г.П. Стариков, В.З. Брюм, В.Г. Гриньов, Я.В. Шажко, Л.М. Прокоф'єва, ІФГП НАН України; Заявл. 06.12.2010; Опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12.
2. Я.В. Шажко, Физико-технические проблемы горного производства, вып. 14, 60 (2011).
3. А.Д. Алексеев, Физика угля и горных процессов, Наукова думка, Киев (2010).
4. Г.П. Стариков, Д.М. Житленок, Я.В. Шажко, Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр., ИГТМ НАНУ, Днепропетровск (2012), вып. 107, с. 142.
5. А.Т. Айруни, Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в шахтах, Наука, Москва (1987).

G.P. Starikov, Ya.V. Shazhko, O.G. Hydoley, A.V. Kravchenko

METHODICAL BASES OF DETERMINATION OF PRESSURE AND GAS CONTENT OF COAL BEDS

A new approach for determination of the pressure and the amount of methane in a coal bed based on use of the formulas accounting for the kinetics of methane desorption from coal fractions is described that significantly simplifies assessment of the methane content of a coal bed in mine conditions.

Keywords: methane, gas content, desorption, efficient diffusion, mass transfer

Fig. 1. Scheme of coal substance located within as closed volume

Fig. 2. Dependence $P = f(t)$ that characterizes desorption of methane from two coal fractions 0.4–0.5 mm (●) and 1.0–1.6 mm (□) during $t = 360 \text{ min}$

Fig. 3. Kinetics of the change in the coefficient of effective diffusion of methane in coal