

УДК 622.537.86

Я.В. Шажко

ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И КОЛИЧЕСТВА МЕТАНА В УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ

Институт физики горных процессов НАН Украины

В статье описаны установленные закономерности десорбции метана из разных фракций угля на основе учета времени фильтрационных и диффузионных потоков, определяющих давление и количество метана в замкнутом объеме, обоснован экспресс-метод измерения количества и давления метана в угольных пластах.

Одной из проблем, возникающих при разрушении газоносных пластов, являются непрогнозируемые процессы газовой выделения, обусловленные фазовым состоянием и количеством метана в поровом объеме угля. Однако до настоящего времени нет единой модели структуры угля и механизма десорбции метана.

Вследствие этого не разработаны надежные экспресс-методы и технические средства для определения давления и количества метана непосредственно в призабойной зоне угольных пластов. Поскольку эта зона, в отличие от нетронутого массива, находится в условиях предельного состояния, в ней происходит нарушение термодинамического равновесия метана, обусловленное его внутривпоровым давлением. Точная оценка этих параметров в режиме реального времени позволила бы повысить качество диагностики газодинамической активности угольных пластов и уточнить параметры вентиляции в очистных и подготовительных забоях.

Наиболее приемлемым решением этой задачи является применение метода десорбметрии, интегрально учитывающей кинетику процесса десорбции метана из поровой системы угля в замкнутый объем [1]. Для этого необходимо установить закономерности изменения плотностей фильтрационных и диффузионных потоков газа и их продолжительности при десорбции в накопительные емкости.

Таким образом, целью работы является обоснование и разработка экспресс-метода определения давления и количества метана в угле, основанного на учете кинетики фильтрационных и диффузионных потоков десорбирующегося газа.

Для обоснования названных закономерностей была принята блочная модель угольного вещества, включающая трещины, соединенные с открытыми

порами (фильтрационный объем), и закрытые поры [2]. Вся трещиновато-пористая система заполнена газом, кроме этого часть метана растворена в блоках угольного вещества, ненарушенного открытыми порами. Десорбция газа из такой модели начинает происходить при нарушении термодинамического равновесия, связанного с разгрузкой от горного давления. При этом газ из фильтрационного объема за счет разности давления сорбционного равновесия и внешнего давления устремляется в окружающую среду. После десорбции части газа из фильтрационного объема и выравнивания пластового и внешнего (атмосферного) давления начинается процесс истечения газа из закрытых пор и блоков по механизму диффузии. Процессы фильтрации газа связаны с процессами диффузии газа из блоков сферической формы радиусом R и описываются уравнением Дарси. Решение уравнений такого класса с дополненными соответствующими граничными условиями позволяет оценить плотность потока метана ($j(t)$) из фракций угля, десорбирующегося к моменту t через единицу площади обнаженной поверхности. В результате решения установлена кинетика плотности потока десорбирующегося газа в виде (в размерности времени) [3]:

$$j(t) = \begin{cases} \frac{P_{nl}}{P_a} \sqrt{\frac{\gamma_o D_f}{\pi t}}, & \text{если } t \ll \frac{R^2}{D_f} \\ \frac{P_{nl}}{P_a} \sqrt{\frac{\gamma_e D_e}{\pi t}}, & \text{если } t \ll \frac{R^2}{D_e} \end{cases},$$

где P_{nl} , P_a – давление газа в угле и окружающей среде соответственно; D_f – коэффициент фильтрации; D_e – коэффициент эффективной диффузии; γ_o – γ_e – эффективная пористость с учетом объема закрытых пор γ и растворимости газа объема открытых пор; $v \left(\gamma_e = \gamma_o + v(1 - \gamma_o) \left(1 - \gamma + \frac{\gamma}{v} \right) \right)$.

Из анализа формулы (1) и (2) следует, что первоначально десорбируется газ, находящийся в трещинах и открытых порах, по механизму фильтрации, и только потом за значительно большее время происходит диффузия основного объема газа, аккумулированного в закрытых порах и растворенного в блоках. При стандартных оценках размера блоков $R \sim 10^{-6}$ м и коэффициенте фильтрации $2 \cdot 10^{-7}$ м²/с фильтрационное время $t_f = \frac{10^{-10}}{10^{-7}} \sim 10^{-3}$ с, при значении $D_e = 10^{-14}$ м²/с диффузионное время $t_d = \frac{10^{-10}}{10^{-14}} \sim 10^4$ с ≈ 166 мин.

Кроме этого, плотность потока газа при других равных условиях прямо пропорциональна давлению газа в поровой структуре угольного вещества. Эта закономерность была использована для обоснования лабораторного метода определения давления и количества метана в угольных пластах.

Лабораторные измерения по определению количества и скорости выделения проводили методом десорбции газа в сосуд известного объема (объемный метод). Для исследований использовали образцы, приготовленные из одного куска угля. После дробления угля и отсева на ситах отбирали гранулы размером 1,0 – 1,5 мм и формировали навески массой 20 г. Далее образцы угля высушивали, ссыпали в контейнеры высокого давления и насыщали сжатым метаном при давлении до 10 МПа в течение 14 сут. Перед регистрацией десорбции производили сброс сжатого газа из свободного объема контейнера в сосуд большой емкости. После этой операции, занимающей не более 5 с, выход метана продолжался, однако скорость его выделения становилась на несколько порядков меньше. Непосредственно после замедления эмиссии метана его поток направляли в другой вакуумированный накопительный сосуд известного объема, после чего производили регистрацию хода десорбции.

Результаты исследований позволили оценить количество свободного метана ($Q_{св}$) в трещинах и открытых порах угля, количество адсорбированного метана в них ($Q_{адс}$) и количество метана в микроблоках угля ($Q_{мб}$). Общая газоносность образцов угля для каждого равновесного давления представляет собой сумму всего десорбированного метана: $\Sigma Q_{г} = Q_{св} + Q_{адс} + Q_{мб}$ [4]. С использованием этого методического подхода был проведен расчет газоносности пласта l_1 – гор. 1305 м шахты им. А.Ф. Засядько. Влажность $W \approx 1,0\%$ $\Sigma Q_{г} = 1,8 + 4,8 + 11,4 = 18 \text{ м}^3/\text{т}$, фактическая газоносность пласта l_1 составляет 21–25 $\text{м}^3/\text{т.с.б.м.}$

Ранее отмечалось, что весь процесс десорбции можно условно разделить на две фазы: первая – фаза интенсивного выделения газа, которая предшествует установлению баланса потоков диффузии и фильтрации, вторая – завершающая фаза, когда источником выделяемого углем газа является только его диффузия из закрытых пор в открытые поры. В ходе первой фазы давление метана в открытых порах угля быстро уменьшается и достигает некоторого минимального значения, при котором фильтрационный поток газа в открытых порах становится равным потоку газа, выделяемого путем диффузии из микроблоков угля. Как показывает практика, в случае с мелкими гранулами угля первая фаза настолько скоротечна, что из-за трудностей технического характера даже в лабораторных опытах ею часто приходится пренебрегать. Таким образом, десорбция газа, наблюдаемая в опытах с мелкими гранулами угля (размером 10мм и меньше), практически постоянно проходит в условиях баланса диффузионного и фильтрационного потоков газа. Поэтому для обоснования экспресс-метода определения давления и количества метана в угле необходимо установить, какое количество метана остаётся в порах после завершения первой фазы выхода метана, то есть к моменту регистрации десорбции.

Для этого изучали зависимость стационарного потока газа, проходящего через уголь, от градиента давления газа. В качестве газа нами в опытах ис-

пользовался воздух и метан. Образец свободного от влаги угля имел форму цилиндра диаметром 13 мм и высотой $l_{\text{цил}} = 12$ мм. Регистрация количества и скорости выделения газа производилась по изменению давления в накопительном сосуде ($P_{\text{нс}}$) известного объема. Полученный результат сравнивается с потоком газа при его десорбции из навески угля. Масса навески составляла 20 гр, размер гранул 2,0–2,5 мм, предварительное насыщение производилось метаном, сжатым до давления 30 атм.

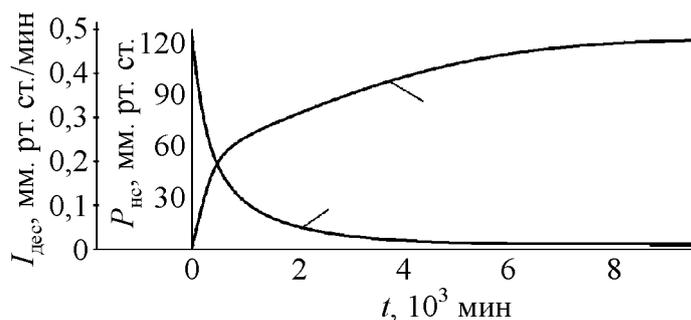


Рис. 1. 1 – давление метана в накопительном сосуде как функция времени десорбции, 2 – скорость изменения давления метана в накопительном сосуде как функция времени десорбции

Проведенные исследования дали возможность оценить степень изменения давления газа в момент регистрации десорбции. Как видно из рис. 1, по мере выхода метана из микроблоков поток десорбции и фильтрации снижается, что свидетельствует об уменьшении давления в порах угля.

Время фильтрационного процесса, в течение которого давление газа в порах снижается от максимального – P_1 (после насыщения угля) до минимального (при десорбции), оценивалась выражением [5]:

$$\tau_f = 4 R_{\text{гр}}^2 \eta \gamma / \kappa \pi^2 P_1, \quad (1)$$

где $R_{\text{гр}}$ – фракционный состав угля; η – вязкость газа; κ – газопроницаемость угля.

Установлено, что величина τ_f различна для разного размера гранул угля и составляет, в частности, 0,048, 0,8 и 7,6 с для гранул диаметром 0,2, 2,0 и 9,5 мм соответственно. Отметим, что полученные оценки величин τ_f справедливы для конкретного угля, который был насыщен метаном под определенным давлением. При другом насыщении баланс потоков диффузии и фильтрации будет характеризоваться другими значениями P_1 и τ_f .

Таким образом, впервые экспериментально подтверждено, что выход газа, содержащегося в открытых порах угля ($Q_{\text{св}} + Q_{\text{адс}}$), происходит в первые доли секунды после расконсервации равновесной системы уголь-метан, а количество оставшегося в открытых порах газа становится пренебрежимо малым. При этом степень снижения газоносности угольного пласта ($\Sigma Q_{\text{г}}$) может составлять более 30%. Для установления этих потерь и сокращения времени анализа углеметановой пробы достаточно измерять диффузионную составляющую потока десорбирующегося метана в шахтных условиях, со-

относить с данными десорбционного паспорта угольного пласта. Десорбционный паспорт (ДП) угольного пласта – это экспериментально установленная информация (в цифровом или графическом виде) о корреляции между интенсивностью эмиссии метана из угля, пластовым давлением метана и его содержанием в угле. Для его составления необходимо выполнить лабораторные измерения кинетики десорбции метана и определить его содержание в угле. Измерения проводятся после предварительного насыщения угля в контейнерах при различных равновесных давлениях $P_{\text{нас}}$ метана. Используются образцы угля равной массы в гранулах 0,2–0,25 мм или 1,0–1,5 мм (в зависимости от марки угля) естественной влажности.

Десорбционный паспорт состоит из двух фрагментов. Первый устанавливает зависимость интенсивности десорбции метана от величины равновесного давления газа при насыщении угля. Десорбция производится в герметичный накопительный сосуд с воздухом, в котором на отрезке времени Δt регистрируется изменение давления – $\Delta P^{\text{дес}}$. В графическом виде сведения о изменении величины $\Delta P^{\text{дес}}$ при десорбции для нескольких значений давления $P_{\text{нас}}$ представляют семейство кривых $\Delta P^{\text{дес}}(t) = f(P_{\text{нас}})$.

На базе полученной информации легко получить зависимость $\Delta P^{\text{дес}}$ от $P_{\text{нас}}$ в любом интервале времени.

Второй фрагмент десорбционного паспорта устанавливает зависимость количества метана в угле от величины его давления насыщения $Q = f(P_{\text{нас}})$. Создание второго фрагмента паспорта в лабораторных условиях включает следующие операции: а) насыщение метаном при различных давлениях (от 0,5 до 10 МПа) нескольких проб угольного штыба естественной влажности; б) определение количества метана в этих пробах угля по методике, описанной в начале третьего раздела.

Для получения полной информации о диффузии, давлении и количестве метана в угольном пласте в режиме реального времени необходимо в шахтных условиях зафиксировать в измерительной емкости давления метана от диффузионной составляющей потока из угольной фракции.

После этого с использованием зависимости $\Delta P^{\text{дес}}(t) = f(P_{\text{нас}})$ и $Q = f(P_{\text{нас}})$ установить давление метана в месте отбора угольной пробы ($P_{\text{нас}}$) и газоносность пласта (Q).

На основании установленных закономерностей по кинетике фильтрационных и диффузионных потоков метана и угольных фракций разработан опытный образец измерителя (заявка на изобретение №а2010 14611 от 06.12.2010) для реализации экспресс-метода определения давления и количества метана в угольных пластах.

С использованием опытного образца десорбометра проведены натурные и приемочные испытания (приказ ГП «ДУЭК» № 135 от 17 мая 2010) экспресс-метода определения давления и количества метана в угольных пластах.

Испытание экспресс-метода и десорбметра проводилось на ОП «Шахта им. А.А. Скочинского» ГП «ДУЭК» по пласту h_6' «Смоляниновский» в нижней нише 2-й западной лавы уклонного поля центральной панели (рис. 2).

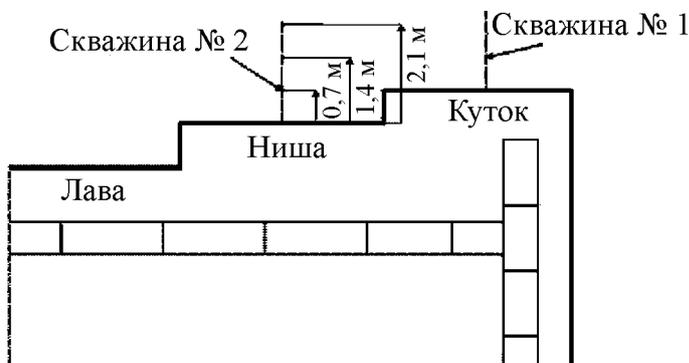


Рис. 2. Схема отбора проб по пласту h_6' - «Смоляниновский» в нижней нише 2-й западной лавы УПЦП ОП «Шахта им. А.А. Скочинского» ГП «ДУЭК»

Пласт h_6' – «Смоляниновский» отрабатывается на глубине 1300 м с углом падения 12–13°. Мощность пласта составляет 1,6–2,0 м, в отдельных зонах пласта могут наблюдаться утонения до 0,5 м и раздутия до 2,6 м. Объемный вес угля составляет 1,27 т/м³, по фактическим данным 1,3–1,35 т/м³. Угольный пласт h_6' относится к особо опасным по внезапным выбросам угля и газа, суффлярным выделениям газа, взрывчатости угольной пыли. Природная газоносность угольного пласта 18–20 м³/т.с.д.

Для определения давления и количества метана в угольном пласте отбирают пробы угля из шпуров диаметром 42 мм с глубины 0,7, 1,4 и 2,1 м. Для этого пробуривают шпур на глубину 0,7 м и прорабатывают буровую штангу, проворачивают без продвижения вперед до полного выхода измельченного угля (бурового измельчения). После этого продолжают бурение шпура до глубины 1,4 м и собирают измельченный уголь, который высыпается из шпура в кассету из двух сит с ячейками. Отсеянный уголь фракцией 0,2–0,4 мм помещают в пробоотборник объемом 20 см³. Время на выполнение всех операций от начала бурения шпура на глубинах 0,5–2,1 м до заполнения пробоотборника не должно превышать 5 мин.

Для отбора следующей пробы угля пробуривают шпур на глубину 1,4 м, прекращают подачу буровой штанги и прорабатывают шпур до полного выхода бурового штыба. После этого продолжают бурить шпур до глубины 2,1 м и собирают штыб на сита. Последующие действия такие же, как и в случае подготовки первой пробы.

Бурение и отбор проб в нижней нише лавы осуществляли по схеме, приведенной на рис. 3, из которого видно, что из двух скважин отбирали пробы угольного штыба с интервалом 0,7 м. Расстояние между скважинами составляло 4 м. Скважину №1 бурили на расстоянии 1 м от стенки выработки. Зависимость давления метана в угольном пласте по скважине №1 по мере продвижения очистного забоя представлена на рис. 3.

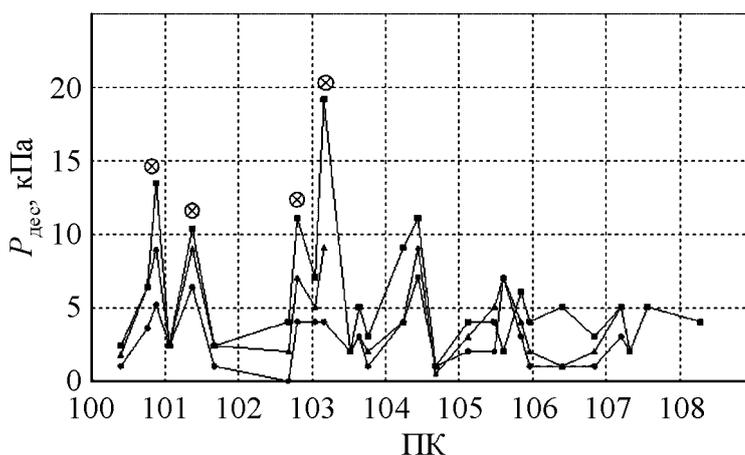


Рис. 3. График изменения давления метана в угле по простиранию угольного пласта (скважина №1): ● – 0,7 м, ▲ – 1,5 м, ■ – 2,1 м, ⊗ – ГДЯ

Аналогичные замеры выполнялись и в скважине №2, находящейся на расстоянии 5 м от кутка. Результаты измерений показали, что на глубине 2,1 м давление метана в пласте уменьшилось в среднем в 2,7 раза относительно измерений в скважине №1. Это свидетельствует о более интенсивной разгрузке и, как следствие, дегазации пласта в области скважины №2 лавы. При этом установлено содержание метана, и его давление в призабойной части пласта зависит не только от природной проницаемости пласта, но и от времени его дегазации (перерыва между взрываниями). Отмечается также устойчивое снижение газового давления и содержания метана в угле в замерах, следующих за ГДЯ, относительно замеров, ему предшествующих. Так, при проведении буровых работ на следующий день после ГДЯ давление газа в пласте стало ниже в среднем в 1,7 раза на глубине 0,7 м, в 2,4 раза на глубине 1,4 м и в 4,0 раза на глубине 2,1 м, чем при выполнении бурения через 2–3 суток.

В целом общее подвигание забоя 2 западной лавы УПЦП за время наблюдений составило 260 м. При этом было выполнено 66 циклов измерений и зафиксировано 5 отжимов, 2 выброса угля и газа интенсивностью до 80 т и 2 выброса интенсивностью 140 т и 960 т угля.

Выводы

1. Установлено, что выход газа, содержащегося в открытых порах угля, происходит в первые секунды после расконсервации равновесной системы уголь-метан, а количество оставшегося в открытых порах газа становится пренебрежимо малым. При этом объем десорбирующегося газа может составлять более 30% газоносности.

2. Теоретически подтверждено, что давление газа, накапливающегося в замкнутом объеме в процессе его десорбции из порового объема мелкофракционного угля, прямопропорционально плотности диффузионного потока и его продолжительности и обратно пропорционально эффективной пористости угля и эффективному коэффициенту диффузии.

3. Впервые обоснован экспресс-метод определения давления и количества метана в угольных пластах, основанного на учете интенсивности диффузии-

онного потока метана из угольных фракций размером 1,5–2,5 мм в накопительный сосуд объемом 300–400 см³ в течение 15–20 мин и интенсивности сорбции и десорбции метана от равновесного давления, установленных в лабораторных условиях для конкретного угольного пласта.

4. Разработан и апробирован в шахтных условиях измеритель для применения экспресс-метода определения давления и количества метана в угольных пластах.

1. *Стариков Г.П.* Применение интегральной десорбметрии для диагностики параметров массопереноса метана в угле [Текст] / Г.П. Стариков, В.А. Васильковский, В.В. Завражин, И.Е. Кольчик, Я.В. Шажко, А.Н. Бойко // Физико-технические проблемы горного производства. – 2010. – Вып. 13. – С. 66–74.
2. *Алексеев А.Д.* Физика угля и горных процессов [Текст] / А.Д. Алексеев. - Киев: Наукова Думка, 2010. – 423 с.
3. *Алексеев А.Д.* Массоперенос метана в угле, обусловленный совместной фильтрацией и диффузией [Текст] / А.Д. Алексеев, Э.Л. Фельдман, Т.А. Василенко, А.Н. Молчанов, Н.А. Калугина // Физика и техника высоких давлений. – 2004. – Т. 14, № 3. – С. 15–28.
4. *Алексеев А.Д.* О распределении метана в каменном угле [Текст] / А.Д. Алексеев, В.А. Васильковский, Я.В. Шажко // Физико-технические проблемы горного производства. – 2007. – Вып. 10. – С. 29–39.
5. *Лейбензон Л.С.* Движение природных жидкостей и газов в пористой среде [Текст] / Л.С. Лейбензон. – М.-Л.: ОГИЗ, 1947. – 244 с.

Я.В. Шажко

ЕКСПРЕС-МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТИСКУ Й КІЛЬКОСТІ МЕТАНУ У ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТАХ

У статті описані встановлені закономірності десорбції метану з різних фракцій вугілля з урахуванням часу фільтраційних і дифузійних потоків, що визначають тиск і кількість метану в замкнутому об'ємі, обґрунтовано експрес-метод вимірювання кількості та тиску метану у вугільних пластах.

Ya.V. Shazhko

EXPRESS METHOD FOR DETERMINING METHANE CONTENT AND PRESSURE IN COAL SEAMS

The article describes established kinetics of methane desorption from the different coal fractions based on filtration and diffusion fluxes that determine the pressure and the amount of methane accumulated in a confined volume. Express method for determining the methane content and pressure in coal seams is substantiated.