

УДК 622.831:537.86

Г.П. Стариков, В.В. Завражин, С.Е. Дегтярь, Е.А. Навка

ОЦЕНКА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ПО ПАРАМЕТРАМ МАССОПЕРЕНОСА МЕТАНА В УГЛЯХ

Институт физики горных процессов НАН Украины

Выполнен сравнительный анализ угольных пластов разной степени газодинамической активности (ГДА) по кинетическим параметрам выхода метана из угля. Установлено, что степень ГДА угольного массива можно оценить по параметру, учитывающему отношение фильтрационной и диффузионной составляющих эффективной диффузии метана из угля.

Введение

Существующие методы прогноза газодинамически активных зон в угольных пластах, основанные на учете динамики начальной скорости газовыделения [1], не исключают ошибок первого рода. Как правило, это связано с недостаточной изученностью основ кинетики метановыделения из трещиновато-пористой структуры угольного вещества.

Для исследования влияния массопереноса метана в угле на его газодинамическую активность (ГДА) была обоснована термодинамическая модель системы уголь-газ, представленная в работе [2]. Базовой основой модели является макромолекула угля, включающая полимерные цепи и мономерные молекулы газа, нагруженные внутренним (поровым) и внешним горным давлением. Согласно общей термодинамической теории, состояние газа, сорбированного углем, оценивается свободной энергией системы. При этом кинетика функционала свободной энергии в первую очередь определяется эффективным коэффициентом диффузии (массопереноса). Величина этого параметра в зависимости от газонасыщенности угля и соотношения внутреннего и внешнего давления может характеризовать особенности фильтрационных и диффузионных потоков десорбирующегося газа из пластов разной степени газодинамической активности.

Актуальной проблемой является установление закономерностей массопереноса метана из углей разной степени газодинамической активности.

Методические основы оценки массопереноса метана в углях.

Оценка вклада фильтрационных и диффузионных параметров массопереноса метана производилась на угольных образцах, отобранных на пластах m_3 , k_3^H , l_3 , k_8 , l_1 , h_{10} , h_6 , характеристики которых приведены в табл. 1. Группирование пластов по степени выбросоопасности показывает, что средняя газоносность невыбросоопасных пластов не превышает $9 \text{ м}^3/\text{т}$, а выбросоопасных и особовыбросоопасных составляет $Q_{в.п.} = 19,75 \text{ м}^3/\text{т}$ и $Q_{о.в.п.} = 26,25 \text{ м}^3/\text{т}$ соответственно. При этом по выходу летучих веществ, кроме пласта h_{10} шахты им. М.И. Калинина, все перечисленные выбросоопасные и особовыбросоопасные пласты идентичны. Учитывая, что газодинамические явления происходят на выбросоопасных и особовыбросоопасных пластах, весь цикл исследований был проведен для установления закономерностей процесса десорбции метана из углей указанной категории пластов.

Таблица 1

Горно-геологические характеристики угольных пластов

№ п/п	Шахта, пласт	Выход летучих V^{daf} , %	Газоносность Q , $\text{м}^3/\text{т.с.б.}$	Глубина ведения работ, м	Категория опасности
1	им. Е.Т. Абакумова, m_3	35,8	5	855	не выбросоопасн.
2	Южная, k_3^H	22,5	7–10	510	не выбросоопасн.
3	Краснолиманская, l_3	35,0	10–15	747	угрожаемый
4	им. А.Ф. Засядько, m_3	33,3	16–23	1322	выбросоопасн.
5	им. А.Ф. Засядько, k_8	30,7	17–25	1305	выбросоопасн.
6	им. А.Ф. Засядько, l_1	31,8	20–25	1033	выбросоопасн.
7	им. К.А. Румянцева, m_3	24,3	15–20	980	выбросоопасн.
8	им. Ф.Э. Дзержинского, m_3	31,7	20–25	1146	выбросоопасн.
9	им. 60-летия Советской Украины, h_{10}	16,1	25–30	870	выбросоопасн.
10	им. М.И. Калинина, h_{10}	18,9	15–20	3,9	особовыбросоопасн.
11	им. А.А. Скочинского, h_6	31,0	20–30	4,0	особовыбросоопасн.

Для определения параметров десорбции метана из исследуемых угольных образцов отбирались две фракции с размерами частиц 0,4-0,5 и 2-2,5 мм массой не менее 10 г. Отобранные частицы угля высушивались в течение 60 мин при температуре 105°C с контролем качества высушивания по спектрам ЯМР. После исчезновения лоренцевой составляющей в спектре ЯМР угля высушенные фракции помещались в емкости высокого давления, в которых производились их вакуумирование при давлении 10^{-4} МПа и насыщение метаном при давлении 10 МПа в течение 144 ч. После этого контейнеры вскрывались и проводи-

лись термогравиметрические измерения десорбции метана при температуре 20°C и 50°C. На рис. 1 показаны зависимости изменения относительного содержания метана от времени десорбции для углей, отобранных на выбросоопасных и особовыбросоопасных пластах при температуре 20 и 50°C.

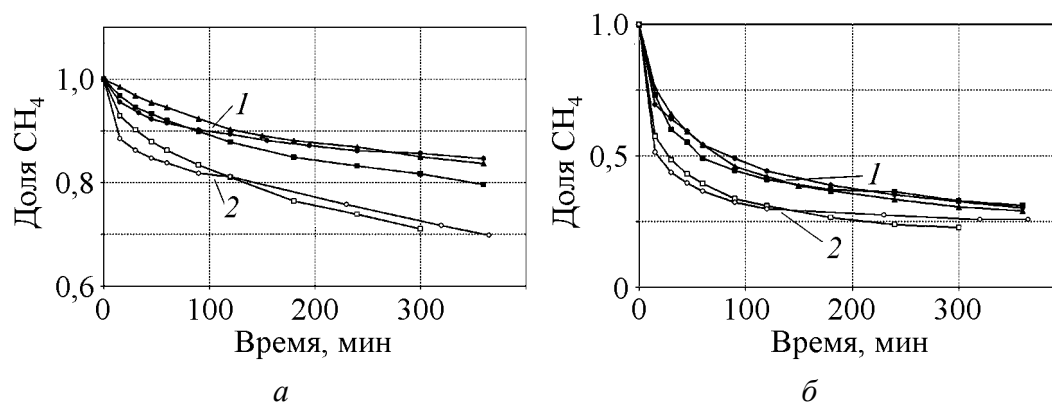


Рис. 1. Изменение доли метана в зависимости от длительности десорбции для углей, отобранных на выбросоопасных и особовыбросоопасных пластах при температурах T , °C: *а* – 20, *б* – 50. □ – шахта им. М.И. Калинина, пласт h_{10} , ○ – шахта им. А.А. Скочинского, пласт h'_6 , ▲ – шахта им. А.Ф. Засядько, пласт m_3 , ● – шахта им. А.Ф. Засядько, пласт k_8 , ■ – шахта им. А.Ф. Засядько, пласт l_1 . 1 – выбросоопасные пласты, 2 – особовыбросоопасные

Как видим из графиков, кривые десорбции выхода метана из угля для особовыбросоопасных пластов лежат ниже, чем для выбросоопасных.

Исходя из блоковой структуры угля [3, 4], кинетику десорбции метана из каменных углей нельзя объяснить существованием только одного механизма выхода метана. Она является следствием суперпозиции двух механизмов: газ путем диффузии из закрытых пор поступает в частично уже свободные, открытые поры и трещины, в которых он, двигаясь далее к поверхности угля, испытывает эффект фильтрации. Поскольку при вязком течении коэффициент фильтрации уменьшается в ходе десорбции, то существует момент времени, когда устанавливается баланс диффузионного и фильтрационного потоков. Таким образом, весь процесс десорбции можно условно разделить на две основные фазы: первая – это фаза процессов, предшествующая установлению баланса потоков; вторая – завершающая фаза, когда источником выделяемого углем газа является только его диффузия. Очевидно, что кинетика выхода газа в этих фазах должна быть различной.

При обработке кривых десорбции метана допустить меньшую среднеквадратичную ошибку (при выборе вида интерполяции) позволяет приближение суммы двух экспонент:

$$N(t) = a \exp(-t/\tau_1) + b \exp(-t/\tau_2),$$

где τ_1 и τ_2 – характерное время десорбции для двух механизмов, параметры a и b связаны с количеством молекул метана в угле.

На рис. 2 показан пример разложения кривой десорбции метана от времени для угля пласта k_8 шахты им. А.Ф. Засядько. Время проведения исследований составило 360 мин.

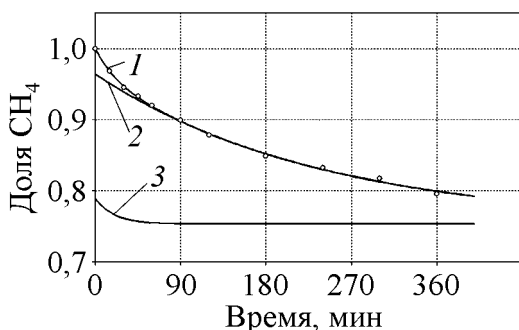


Рис. 2. Аппроксимация кривой десорбции метана от времени для угля пласта k_8 шахты им. А.Ф. Засядько двумя экспонентами: 1 – экспериментальная кривая, 2 – диффузионная кривая, 3 – фильтрационная кривая

Таким же методом были проведены аппроксимации полученных кривых для углей всех пластов при двух температурах.

В табл. 2 приводятся сводные данные характерного времени десорбции метана из углей выбросоопасных и особовыбросоопасных пластов.

Таблица 2

Сорбционные и кинетические характеристики выбросоопасных и особовыбросоопасных углей

№ п/п	Шахта, пласт,	Количество десорбированного метана ($T = 20^\circ C$), %		Содержание метана в угле, %	Количество десорбированного метана ($T = 20^\circ C$), %		Остаточное содержание метана в угле, %
		Кинетика фильтрации и диффузии, мин			Кинетика фильтрации и диффузии, мин		
		τ_1	τ_2		τ_1	τ_2	
1	им. А.Ф. Засядько, m_3	$\frac{3,3}{40,3}$	$\frac{12,7}{278}$	84	$\frac{23,7}{17,4}$	$\frac{47,3}{185}$	29
2	им. А.Ф. Засядько, k_8	$\frac{3,6}{48,4}$	$\frac{21,0}{238}$	75,4	$\frac{24,7}{20,1}$	$\frac{44,3}{117}$	31
3	им. А.Ф. Засядько, l_1	$\frac{3,1}{46,2}$	$\frac{11,9}{320}$	85	$\frac{22,5}{22,1}$	$\frac{47,4}{215}$	30
4	им. М.И. Калинина, h_{10}	$\frac{16,7}{10,2}$	$\frac{14,3}{217}$	69	$\frac{48,1}{5,6}$	$\frac{28,9}{57,7}$	23
5	им. А.А. Скочинского, h'_6	$\frac{12,5}{8,3}$	$\frac{16,5}{202}$	71	$\frac{45,4}{5,6}$	$\frac{28,6}{60,5}$	26

Анализ полученных результатов показал, что характерное время процесса фильтрации (показатель первой экспоненты (τ_1) при $T=20^\circ C$ и $T=50^\circ C$) для углей особовыбросоопасных пластов в 4-5 раз меньше, чем у выбросоопасных. При этом в среднем до 40% объема сорбированного метана в углях особовыбросоопасных пластов десорбируется в первые 10 минут.

Закономерности массопереноса метана в угольных пластах разной степени газодинамической активности

Для установления закономерностей массопереноса метана в углях была определена кинетика его десорбции из выбросоопасных и особовыбросоопасных пластов (см. табл. 1) и рассчитаны значения коэффициентов массопереноса (эффективная диффузия). Результаты исследований представлены на рис. 3.

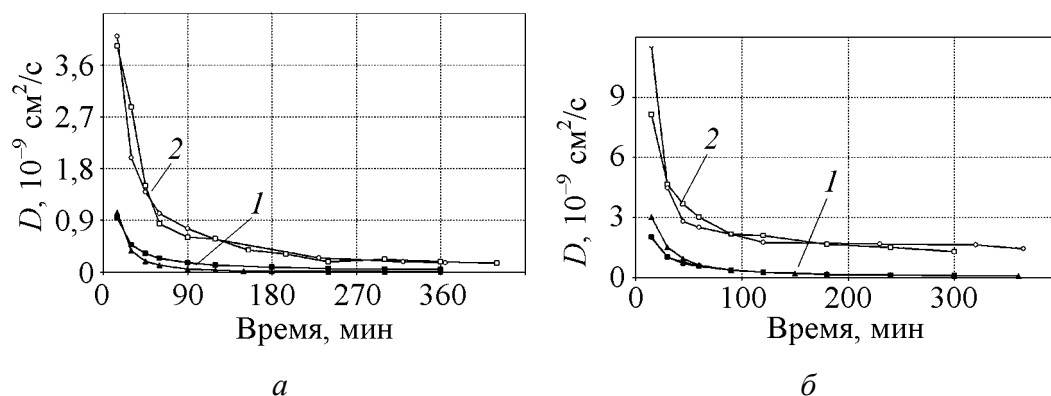


Рис. 3. Зависимость коэффициента массопереноса от времени при десорбции метана из углей выбросоопасных и особовыбросоопасных пластов при температурах T , °C: *а* – 20, *б* – 50. □ – шахта им. М.И. Калинина, пласт h_{10} , ○ – шахта им. А.А. Скочинского, пласт $h'6$, ▲ – шахта им. А.Ф. Засядько, пласт t_3 , ● – шахта им. А.Ф. Засядько, пласт k_8 , ■ – шахта им. А.Ф. Засядько, пласт l_1 . 1 – выбросоопасные пласты, 2 – особовыбросоопасные

Графики показывают, что значения коэффициента массопереноса для углей особовыбросоопасных пластов в 4–5 раз больше, чем у выбросоопасных, несмотря на то, что максимальное значение содержания метана в образцах отличается не более чем на 10 %.

При помощи полученных результатов и с учетом блоковой структуры угля зависимости $D_{эф} = f(t)$ были аппроксимированы двумя экспонентами, ответственными за фильтрационную и диффузионную составляющие эффективной диффузии метана из угля, и в виде интегральных значений приведены в табл. 3.

Здесь же представлены результаты определения энергии активации десорбции метана из углей разной степени ГДА [5]. Анализ результатов показывает, что величина как фильтрационного, так и диффузионного потоков возрастает в 3–6 раз с ростом степени ГДА угля. При этом их отношение фактически является постоянным для каждой категории ГДА. Так, у невыбросоопасных пластов $V_i = 12,3$, у выбросоопасных $V_i = 6,9$, у особовыбросоопасных $V_i = 4,7$. Эта закономерность подтверждается значениями энергии активации десорбции метана из углей. Минимальным значением обладают особоопасные угольные пласты.

Таблица 3

Параметры массопереноса метана в угольных пластах разной степени ГДА

№ п/п	Шахта, пласт, категория опасности	$D_f, 10^{-9}$ м ² /сек	$D_d, 10^{-10}$ м ² /сек	$E, 10^3$ Дж/моль	$B_i = \frac{\bar{D}_f}{\bar{D}_d}$	$\bar{E}, 10^3$ Дж/моль
1	2	3	4	5	6	7
1	им. Е.Т. Абакумова, m_3 , не выбросоопасный	0,7	0,77	105,6	12,3	105,53
2	Южная, k_3^H , не выбросоопасный	1,0	0,74	109,7		
3	Краснолиманская, l_1 , угрожаемый	1,8	1,31	95,2		
4	им. А.Ф. Засядько, m_3 , выбросоопасный	2,2	3,0	68,41	6,9	62,3
5	им. А.Ф. Засядько, k_8 , выбросоопасный	2,9	4,8	61,82		
6	им. А.Ф. Засядько, l_1 , выбросоопасный	3,1	5,8	60,84		
7	им. К.А. Румянцева, m_3 , выбросоопасный	1,8	1,5	62,4		
8	им. Ф.Э. Дзержинского, m_3 , выбросоопасный	2,5	2,6	62,1		
9	им. 60-летия Советской Украины, h_{10} , выбросоопасный	2,8	4,3	58,7		
10	им. М.И. Калинина, h_{10} , особовыбросоопасный	3,9	8,4	41,65	4,7	43,21
11	им. А.А. Скочинского, h_6 , особовыбросоопасный	6,0	12,4	44,78		

Выводы

Установлено, что степень газодинамической активности угольного массива можно оценить по параметру, учитывающему отношение фильтрационной и диффузионной составляющих эффективной диффузии метана из угля.

1. ДНАОП 1.1.30 – 1.XX.04. Безопасное ведение работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям [Текст]. – Киев, 2004. – 195 с.
2. Алексеев А.Д. Численное моделирование выхода метана из угля с учетом волны разгрузки и раскрытие пористости при изменении напряжений [Текст] / А.Д. Алексеев, Г.П. Стариков, А.Э. Филиппов // Проблемы гірничого тиску: Сб. научн. трудов. – Донецк: ДНТУ. – 2003. – № 9. – С. 120–151.
3. Алексеев А.Д. Кинетика и механизмы десорбции метана из угля [Текст] / А.Д. Алексеев, В.А. Васильковский, Н.А. Калугина // Физико-технические проблемы гор-

ного производства. Сборник научных трудов. – Донецк: ИФГП НАНУ, 2005. – № 8. – С. 59–71.

4. *Алексеев А.Д.* Фазовые состояния и кинетика десорбции метана из угля [Текст] / А.Д. Алексеев, В.А. Васильковский, Н.А. Калугина // Геотехнічна механіка. Межведомственный сборник научных трудов. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 67. – С. 32–37.
5. *Стариков Г.П.* Оценка степени газодинамической активности угольного пласта по изменению энергии активации десорбции и температуры дегидратации [Текст] / Г.П. Стариков, В.В. Завражин, А.Н. Бойко, Я.В. Шажко // XVIII Международная научная школа им. Академика С.А. Христиановича «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках». – Крым, Алушта, 2008. – С. 30–32.

Г.П. Старіков, В.В. Завражин, С.Є. Дегтяр, Є.О. Навка

ОЦІНКА ГАЗОДИНАМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ ЗА ПАРАМЕТРАМИ МАСОПЕРЕНОСУ МЕТАНУ У ВУГІЛЛІ

Виконано порівняльний аналіз вугільних пластів різного ступеня газодинамічної активності (ГДА) за кінетичними параметрами виходу метану з вугілля. Встановлено, що ступінь ГДА вугільного масиву можна оцінити за параметром, що враховує відношення фільтраційної і дифузійної складових ефективною дифузії метану з вугілля.

G.P. Starikov, V.V. Zavrazhin, S.E. Degtyar, E.A. Navka

ESTIMATING THE GAS DYNAMIC ACTIVITY OF COAL SEAMS USING METHANE MASS TRANSFER PARAMETERS IN COALS

The comparative analysis of coal seams with different degree of gas dynamic activity (GDA) as determined from the kinetic parameters of methane escape from coal is carried out. It is established that the coal massif's GDA degree can be estimated using a parameter related to the ratio of filtration and diffusion components of the methane escape rate from coal.