

УДК 622.831:537.86

МАСШТАБНЫЙ ЭФФЕКТ В ДЕСОРБЦИИ МЕТАНА ИЗ КАМЕННОГО УГЛЯ

Васильковский В. А.

(ИФГП НАНУ, г. Донецк, Украина)

Пономаренко Д. А.

(Донецкая ОГА, Украина)

Вивчалася залежність інтенсивності емісії метану від розміру гранул в зразках вугілля однакової маси. Виявлено, що залежність існує для невеликих гранул ($R < 2$ мм) і вона відсутня, коли розмір гранул перевищує товщину вугільного шару у шаруватій структурі вугілля.

Dependence of the rate of methane emissions on the pellet size in coal samples of equal weight was studied. It is determined that there is dependence for small pellets ($R < 2$ mm) and there is no dependence when the size of the pellets exceeds the thickness of coal layer in the layered coal structure.

Анализ литературы показывает [1-5], что до сих пор сохраняется актуальность информация о механизмах десорбции метана из угля. Считается бесспорным, что в пористых материалах, возможны процессы фильтрации и диффузии или их суперпозиция. Однако одной лишь комбинацией этих механизмов нельзя объяснить все известные опытные данные. Например, решение проблемы аномально слабой зависимости скорости эмиссии метана от размера гранул угля стало возможным только после введения представления о блочном строении ископаемых углей [6].

В работе [6] была предложена модель пористой структуры угля, согласно которой вся масса угля разбита соединяющимися между собой трещинами и макропорами на отдельные структур-

ные элементы – блоки. Решение уравнения материального баланса в блочной модели позволило авторам другой работы [7] найти параметры системы уголь-метан, соответствующие двум предельным случаям, когда десорбция метана из угля происходит преимущественно путем диффузии или фильтрации.

Прогресс в понимании механизма эмиссии метана наметился после опытов по десорбции метана из образцов угля такого размера, когда могут быть сравнимы интенсивности диффузионного и фильтрационного движения газа [8, 9].

В качестве базового параметра при анализе использовалось характерное время τ^{dec} десорбции метана из угля:

$$\tau^{dec}(t) = \frac{Q_y(t)}{|\partial Q_y(t)/\partial t|}, \quad (1)$$

где $Q_y(t)$ – количество метана в угле, а $|\partial Q_y(t)/\partial t|$ – скорость его изменения. Для любого момента t , записанный в такой форме параметр τ^{dec} , имеет смысл продолжительности процесса истощения угля в предположении, что интенсивность эмиссии метана постоянна. Выбор характерного времени τ^{dec} как инструмента анализа обусловлен двумя причинами. Одна – это его высокая чувствительность к размеру гранул угля. Вторая, не менее важная, связана с тем, что величина τ^{dec} не зависит от количества гранул угля в образцах. Значение τ^{dec} определяется с помощью графического анализа, либо путем оптимизации параметров соответствующей интерполяционной функции, описывающей ход десорбции.

В блоковой модели газ путем диффузии из микроблоков поступает в открытые поры и трещины, в которых он, двигаясь далее к поверхности угля, испытывает эффект фильтрации. Последний приводит к зависимости плотности потока газа и времени его истечения от средней длины R , т.е. радиуса гранул угля, и других характеристик фильтрационных каналов. Характерное время фильтрации τ^f определяется вязкостью η газа, открытой

пористостью γ и проницаемостью κ угля, а также зависит от перепада давления газа $\Delta P_f(t)$ в фильтрационном канале [10]:

$$\tau^f(t) = Q_y^f(t) / \left[\partial Q_y^f(t) / \partial t \right] = R^2 / D_f(t) = R^2 \eta \gamma / (\pi^2 \kappa \Delta P_f(t)). \quad (2)$$

В этом выражении $Q_y^f(t)$ – количество газа в фильтрационном канале, а $\left| \partial Q_y^f(t) / \partial t \right|$ – поток газа в этом канале.

Характерное время диффузии определяется как $\tau^d(t) = Q^d(t) / \left[\partial Q^d(t) / \partial t \right] = r_{\text{мб}}^2 / D_d$, где $Q^d(t)$ – количество газа, формирующего градиент концентрации метана в микроблоках, а $\left| \partial Q^d(t) / \partial t \right|$ – диффузионный поток газа. Уменьшение перепада давления газа в фильтрационных порах при десорбции сопровождается уменьшением параметра фильтрации $D_f(t)$, ослаблением интенсивности газового потока в фильтрационных каналах, в результате чего возникают условия для баланса потоков диффузии и фильтрации. Этот баланс выдерживается до окончания десорбции.

Использование параметра «характерное время десорбции» позволяет в аналитической форме получить решение проблемы аномальной зависимости времени и скорости выхода метана от размера кусков угля:

$$\tau^{dec}(t) = \tau^f(t)(1 + U) + \tau^d, \quad (3)$$

где коэффициент U характеризует соотношение количества газа в микроблоках и в открытых порах угля. Так как τ^d не зависит от размера кусков угля, то зависимость τ^{dec} от R определяется только первым слагаемым в (3). Из формулы (3) следует также, что в отсутствие фильтрации время выхода газа из угля будет полностью определяться временем диффузии τ^d из угольного блока.

В материалах с высокой проницаемостью, где $\tau^f(t)(1 + U(t)) \ll \tau^d(t)$, соотношение τ^{dec} / τ^d для гранул различного размера (R_1 и R_2) будет близко к единице. И, наоборот, для случая, когда $\tau^f(t)[1 + U(t)] \gg \tau^d(t)$ будем наблюдать

$$\lim_{\frac{\tau^d}{(1+U)\tau^f} \rightarrow 0} \frac{{}_1\tau^{\text{dec}} / {}_2\tau^{\text{dec}}}{\tau^f} = \frac{{}_1\tau^f / {}_2\tau^f}{\tau^f} \approx (R_1/R_2)^2.$$

Таким образом, сравнивая ход десорбции газа из гранул, отличающихся размером, например, в 10 раз, мы можем получить времена десорбции, отличающиеся от 1 до 100 раз, – в зависимости от того, какой механизм десорбции преобладает в данном материале. Например, согласно эксперименту, в антраците – ${}_1\tau^{\text{dec}} / {}_2\tau^{\text{dec}} \approx 30$, а в углях марки Ж – ${}_1\tau^{\text{dec}} / {}_2\tau^{\text{dec}} \approx 2$. Следовательно, в последнем случае роль диффузионной составляющей механизма выхода газа выше, чем в антраците.

Приведённые выше численные значения соотношения ${}_1\tau^{\text{dec}} / {}_2\tau^{\text{dec}}$ были получены для образцов угля в гранулах (кусках) размером $R_1 \approx 1$ мм и $R_2 \approx 0,1$ мм. Несомненно, практическое значение имели бы сведения о том, как изменяется параметр τ^{dec} при переходе к значительно более крупным кускам угля. Этот вопрос важен для определения времени накопления опасных концентраций метана в выработках и бункерах [1], для оценки развития условий, несущих угрозу самовозгорания угля [4] и др.

Цель данной работы – выявить характер изменения дебита и продолжительности десорбции метана в зависимости от размера кусков отбитого угля.

В данной работе представлены результаты экспериментального изучения кинетики десорбции метана из образцов угля различных фракций.

Методика подготовки образцов для исследований и устройство десорбционной установки описаны ранее в [8]. Для настоящих исследований в устройстве была использована электронная система регистрации давления в измерительном сосуде, что повысило качество получаемой информации. В опытах использовались угли естественной влажности: шахты им. А. Ф. Засядько, пласт m_3 , и шахты «Холодная балка», пласт h_{10}^8 . Уголь шахты «Холодная балка» при измельчении на вибромельнице отсеивался на ситах для получения фракций с размером частиц 15-20 мм, 9-10 мм, 4-5 мм, 2-2,5 мм, 0,4-0,5 мм и 0,2-0,25 мм. Технология приготовления образцов угля шахты им. А. Ф. Засядько была та-

кой же. В результате выделены фракции с размером частиц 15-20 мм, 9-10 мм, 4-5 мм, 2-2,5 мм и 0,2-0,25 мм. Все образцы угля имели одинаковую массу – 20 г.

Лабораторные исследования кинетики десорбции метана из угля, проводимые объёмным методом, включают три этапа: 1-й – насыщение угля сжатым метаном, 2-й – предварительный сброс сжатого газа из контейнера с углем после его насыщения и 3-й – сбор метана, выделяемого углем в накопительный сосуд (НС). Насыщение всех образцов углей метаном производилось при давлении 1,8 МПа в течение 12 суток. После сброса сжатого газа из свободного объёма контейнера в атмосферу начиналась регистрация медленного и продолжительного процесса десорбции – выхода метана из микроблоков угля в накопительный сосуд.

На рисунках 1 и 2 показана зависимость объёма Q десорбируемого метана от размера R гранул в образцах углей шахт «Холодная балка» и им. А. Ф. Засядько, соответственно.

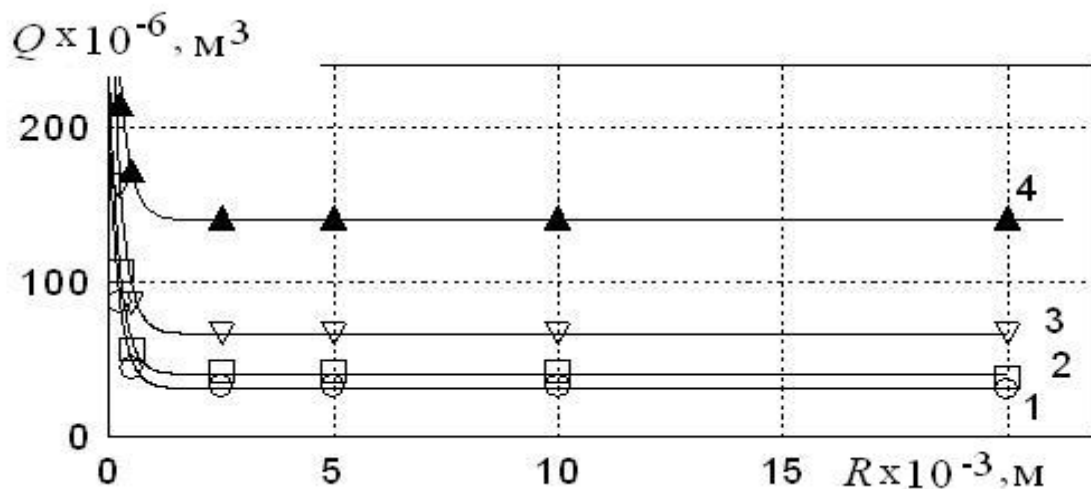


Рис. 1. Зависимость объёма десорбируемого метана от размера кусков угля шахты «Холодная балка» (h_{10}^8) и продолжительности эмиссии: 1 – 20 минут; 2 – 30 минут; 3 – 100 минут; 4 – 500 минут. Масса угля в образцах 20 г, давление насыщения метаном 1,4 МПа

Как следует из рисунка 2, для угля шахты им. А. Ф. Засядько вид зависимости $Q(R)$ имеет сложный характер. В области малых гранул ($R < 2$ мм) увеличение их размера сопровождается уменьшением эмиссии метана. Для более крупных гранул ($R > 2$ мм) наблюдается обратная зависимость: чем больше размер гранул угля, тем интенсивнее выделение метана. Полученные результаты неожиданны ещё и тем, что в зависимости $Q(R)$ наблюдаются признаки «насыщения»: для гранул размером больше 10 мм интенсивность выделения газа одинакова. В случае угля шахты «Холодная балка» характер зависимости $Q(R)$ более простой, хотя насыщение, как видно из рисунка 1, наступает значительно раньше.

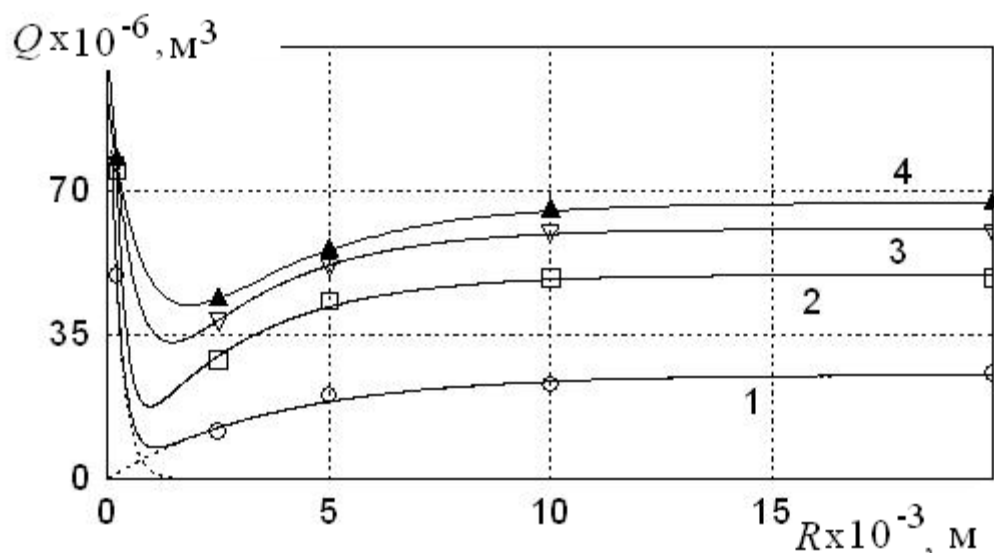


Рис. 2. Зависимость объёма десорбируемого метана от размера кусков угля шахты им. А. Ф. Засядько (пласт m3) и продолжительности эмиссии: 1 – 50 минут; 2 – 500 минут; 3 – 1000 минут; 4 – 1500 минут. Масса угля в каждом образце 20 г, давление насыщения метаном 2 МПа

Обсуждение результатов удобнее начинать с данных, полученных для угля шахты «Холодная балка». Исходя из условий подготовки к измерениям, можно считать, что начальное (перед десорбцией) количество метана во всех образцах угля было оди-

наковым. Очевидно также, что прирост объёма Q метана в накопительном сосуде за время t пропорционален интенсивности десорбции из образца угля. Учитывая эти соображения, далее предметом анализа будет параметр τ^{dec} , так как он, как видно из формулы (1), связан с интенсивностью десорбции. И, поскольку в основе десорбции лежат механизмы диффузии и фильтрации, то причину необычного изменения её интенсивности следует искать в изменении составляющих параметра τ^{dec} в (3).

Выше отмечалось, что зависимость τ^{dec} от R определяется только первым слагаемым в (3). Из выражения (2) видно, что на величину τ^f влияют структурные характеристики угля такие, как длина R пути фильтрации (открытой поры или трещины) и проницаемость κ среды фильтрации. Если считать проницаемость постоянной, то с ростом R будет возрастать τ^f , а, следовательно, и параметр τ^{dec} . Соответственно интенсивность десорбции $\partial Q(t) / \partial t = Q(t) / \tau^{dec}(t)$ будет уменьшаться, что и наблюдается при небольших размерах гранул угля. При переходе к гранулам большего размера ослабление зависимости Q от R указывает на то, что этот переход сопровождается ростом среднего значения проницаемости угля в образцах. Это возможно только в случае, когда фильтрационный объём в угле образован пустотами, по крайней мере, двух видов: трещинами, которые связаны с кливжём угля в пласте, и порами малого сечения, образующими сеть фильтрационных каналов в пластинах угля (между трещинами). На рисунке 3 схематично показана структура угля, которую можно наблюдать на его поверхности в отраженном свете (кроме пор в пластинах угля).

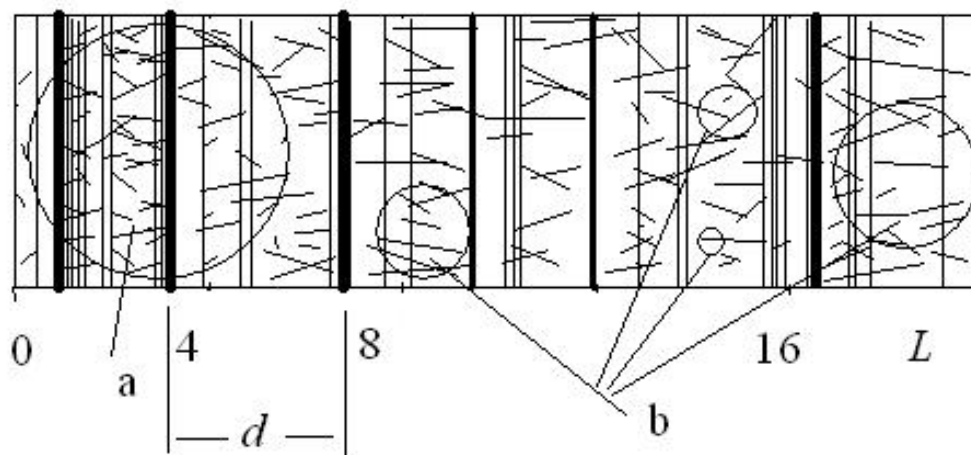


Рис. 3. Схематическое изображение кливажа в отбитом каменном угле

На нем показан кливаж – разделение угля по параллельным трещинам на тонкие пластины. Темные вертикальные линии различной толщины – это трещины в угле. Слабые поперечные полосы изображают открытые поры малого сечения. В отличие от трещин движение газа в тонких порах более затруднено, что приводит к зависимости времени его истечения от R . Этот эффект наблюдается в гранулах меньше 2 мм, которые получены измельчением пластин угля (область угля «b»). С ростом кусков угля вероятность появления в их теле включений трещин возрастает, что ослабляет зависимость эмиссии метана от R . При $R > 2$ мм усреднённая трещиноватость угля (область «a») в гранулах растёт до максимальной величины и далее не изменяется. Соответственно исчезает и зависимость Q от R .

Как видно из рисунка 1, десорбция метана из угля шахты А. Ф. Засядько имеет, в основном, такие же особенности. Отличие только в более сложном характере зависимости $Q(R)$ при переходе от мелких гранул к большим. По-видимому, это связано с особенностями изменения трещиноватости угля во время приготовления образцов. Можно предположить, что в этом угле сцепление противоположных поверхностей трещин не достаточно велико, в результате чего при продолжительном дроблении угля его измельчение происходит не только в виде разрушения тела пластин угля, но и за счёт «скола» ближайших пластин при раскры-

вании трещин. В итоге после отсева и выделения мелкой фракции угля в образце начинают преобладать гранулы, средняя трещиноватость которых столь же низка, как и в самых малых гранулах. Уменьшение содержания трещин в гранулах после механической обработки угля может быть причиной образования минимума на кривой зависимости Q от R .

Интенсивность выделения метана из отбитого каменного угля зависит не только от размера его кусков, но и параметров кливажа в угольном пласте. Если размер R кусков меньше, чем расстояние d между трещинами в угле, то интенсивность I газоразделения, отнесённая к единице массы угля, уменьшается с ростом R . При $R > d$ зависимость между интенсивностью I и размером кусков угля отсутствует. Это связано с тем, что каждая трещина в куске угля служит таким же концом пути фильтрации газа при десорбции, каким является внешняя поверхность угля. Поэтому, каким бы большим ни был кусок отбитого угля, удельная интенсивность его дегазации будет такой же, как и для кусков, размером $R \approx d$.

Таким образом, можно говорить о существовании масштабного эффекта в десорбции метана из каменного угля. Изменение кинетики десорбции метана, так же, как и понижение прочности в материалах с дефектами [11], происходит при увеличении размеров образца или при повторных нагрузках, которые приводят к его хрупкому разрушению.

Для углей, в которых естественного кливажа нет, масштабный эффект в десорбции не должен наблюдаться.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Греков С. П. Газовыделение из отторгнутого от массива угля и опасность скопления взрывоопасных концентраций метана в шахтных накопительных бункерах и замкнутых объёмах / С. П. Греков, И. Н. Смоланов // Уголь Украины. — 2003. — № 1. — С. 52—54.
2. Жупанина Е. С. Газовыделение из отбитого угля / Е. С. Жупанина, Н. И. Устинов // Научные сообщения ИГД им. А. А. Скочинского. — М. : Недра, 1967. — Вып. 33. — С. 26—36.

3. Истечение метана из частиц угля / С. П. Греков, Б. И. Кошовский, М. В. Илык, И. Н. Смоланов // Горноспасательное дело : сб. науч. тр. / НИИГД. — Донецк, 2002. — С. 74—88.
4. Пашковский П. С. Влияние интенсивности выделения метана из отбитого угля на склонность к самовозгоранию / П. С. Пашковский, С. П. Греков // 10-я сессия Международного бюро по горной теплофизике «IBMT-2005» : докл. 14-18 февраля 2005 г. — Гливице, Польша, 2005. — С. 73—86.
5. Премыслер Ю. С. Газовыделение из отбитого угля / Ю. С. Премыслер, М. Ф. Яновская // Методы определения газоносности пластов и прогноза газообильности шахт. — М. : Госгортехиздат, 1962. — С. 267—274.
6. Коган Г. Л., Крупеня В. Г. Движение метана в ископаемых углях. В кн. «Физико-химия газодинамических явлений в шахтах. М.: Наука — 1972. — С. 84—94.
7. Alexeev A., Feldman F., Vasilenko T. Methane desorption from a coal-bed, Fuel, v.88, (2007).
8. Алексеев А. Д., Васильковский В. А., Калугина Н. А. Кинетика и механизмы десорбции метана из угля // Физико-технические проблемы горного производства. Донецк. — 2005. — Вып. 8. — С. 9—21.
9. Васильковский В. А., Молчанов А. Н., Калугина Н. А. Фазовые состояния и механизмы десорбции метана из угля // Физико-технические проблемы горного производства. Донецк. 2006. — Вып. 9. — С. 62—70.
10. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М.-Л. : ОГИЗ, 1947. — 244 с.
11. Шашенко А. Н., Сдвижкова Е. А., Кужель С. В. Масштабный эффект в горных породах / Донецк: изд-во «Норд-Пресс», 2004. — 126 с.