

УДК 622.324.5

ТАТНЕВА Г.Г.

Теоретические аспекты метановыделения из угольных пластов

Величина природного давления газа в микропорах и природных микротрещинах в угольных пластах является одним из основных показателей, определяющих объем метана в сорбированном и свободном состояниях в пластах, и одним из косвенных показателей выбросоопасности угольных пластов [1]. Метан в угольных пластах находится в основном в абсорбированном и адсорбированном состояниях и в относительно небольших объемах в свободном состоянии. С ростом глубины горных работ объем метана в свободном состоянии увеличивается и может достигать 10-12% [1].

Если мы в качестве функции отклика Φ из предыдущих исследований возьмем относительное газовыделение $\Phi = c/c_0$ и линеаризуем это выражение, то получим формулу:

$$\frac{c}{c_0} = \frac{kT}{C_1} \cdot \frac{A}{G^0} \cdot c_0, \text{ или } c = \frac{kT}{C_1} \cdot \frac{A}{G^0} \cdot c_0^2, \quad (1)$$

где c_0 – начальная концентрация метана в угле (угольном пласте), т.е. метаноносность;

A – работа (энергия) внешних сил (поля);

C_1 – константа.

Формула (1) дает квадратичную зависимость газовой выделение от метаноносности пласта (рис. 1).

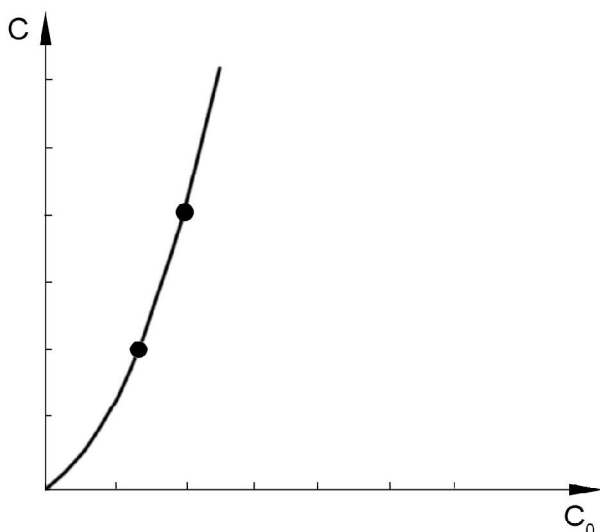


Рисунок 1 – Схематическая зависимость газовой выделение от метаноносности угольного пласта

В простейшем случае метановыделение линейно увеличивается с увеличением глубины залегания пласта и формула (1) дает квадратичную зависимость роста метаноносности от глубины залегания.

В таблице 1 соответствующие величины приведены для угольных свит Карагандинского бассейна.

В природном состоянии в угольном веществе существует динамическое равновесие между адсорбированным, абсорбированным (в твердом растворе) и метаном в свободной фазе, которое характеризуется тем, что в любой момент при отсутствии экстремальных внешних воздействий число молекул метана, переходящего из свободной фазы в сорбированное состояние, практически равно числу молекул десорбирующегося метана. Свободный метан в угольном пласте в природных условиях занимает объем, в пределах которого взаимодействие его молекул с поверхностью угля сравнительно невелико, поэтому объем метана в свободной фазе в пустотах угля обычно незначителен. В таких условиях метан, находящийся в угле в свободной фазе, играет роль «подпора» для сорбированного метана, в значительной степени препятствуя его десорбции. Нарушение динамического равновесия между метаном в свободной и сорбированной фазах в природной системе «уголь – метан – природная влага» при перераспределении горного давления (под воздействием тектонических процессов или горных работ) проявляется в превышении числа десорбирующихся молекул метана над числом сорбируемых углем. Установлено [1], что объем метана в свободной фазе на глубине 700-1200 м составляет в углях средних степеней метаморфизма ($V^{dat} = 18-29\%$) от 5 до 10 % всего содержащегося в угле метана; в углях высокой степени метаморфизма ($V^{dat} = 8-14\%$) от 4 до 6% и в малометаморфизованных углях ($V^{dat} = 30-38\%$) – до 10-12%. При нарушении установившегося динамического равновесия в природной системе «уголь – метан – природная влага» движение молекул метана из природных угольных пор происходит как путем перемещения по их стенкам, так и путем перехода из абсорбированного состояния в адсорбированное и затем в свободное, с выделением метана из свободной фазы, то есть происходит распад углеметана, сопровождаемый снижением давления метана в угле.

Таблица 1 – Динамика роста средней метаноносности угля (m^3/t) в Карагандинском угольном бассейне

Глубина от поверхности, м	Угольная свита			
	Карагандинская, Ашляринская		Долинская, Тентекская	
	пласты			
	К ₁ – К ₄	К ₅ – К ₈	Д ₁ – Д ₅	Д ₆ – Т
< 150	3,0	2,0	0	0

151-200	6,7	9,0	3,7	0,6
201-250	14,0	13,2	12,2	3,9
251-300	17,0	15,8	15,4	6,0
301-350	18,5	16,4	16,2	9,4
351-400	19,3	16,8	16,5	10,5
401-450	19,8	17,4	16,8	13,7
451-500	20,1	18,0	17,2	15,8
501-600	20,5	18,5	17,9	17,1
601-700	20,7	18,9	18,3	19,0
701-800	20,8	19,5	нет данных	нет данных

Величина природного давления метана в угольных пластах на глубинах ниже верхней границы метановых газов обычно меньше гидростатического, но в ряде пластов карагандинской свиты превышает его.

При снижении давления метана в пласте в процессе его десорбции при дегазации часть выделившегося метана, определяемая по разнице сорбционных емкостей угля при первоначальном и вновь установившемся давлениях, переходит в свободное состояние, а количество метана, сохранившегося в угле в сорбированном состоянии, соответствует новым термодинамическим условиям (температуре, давлению). Поэтому любой метаноносный угольный пласт, обладающий природной влажностью, следует рассматривать как единую газогидродинамическую систему, в которой изменение давления метана в какой-либо точке постепенно передается прилегающему массиву угольного пласта, размеры которого зависят от величины природной газопроницаемости и влажности, а также от степени метаморфизма угля. Величины природного давления метана в пласте и сорбционной способности угля тесно взаимосвязаны. Теплота сорбции природной системы «уголь – метан – природная влага» равна 17-20 кДж/моль.

Из-за сложного анизотропного строения угля процесс нарушения динамического равновесия между газовыми фазами протекает с запаздыванием и может быть отнесен к самотормозящимся (самозатухаемым). Исследованиями установлено [1], что при прочих равных условиях (величины природной метаноносности, влажности, пористости, температуры) продолжительность активного газоистощения (дегазации) угольного пласта – природного пористого сорбента – примерно в 4 раза больше, чем продолжительность газоистощения несорбирующего коллектора – пористых песчаников, песков и т.п. Запаздывание нарушения равновесия между сорбатом-угольным пластом и сорбентом-метаном выражается зависимостью $1/\sqrt{t}$.

Поэтому вследствие относительно небольших потерь метана с момента вскрытия угольного пласта в процессе создания в скважине замерной камеры до момента начала измерений величины давления метана после окончания периода нарастания и стабилизации давления метана его величина определяется значительно точнее, чем на месторождениях природного газа, истечение которого в скважину из природного коллектора происходит гораздо быстрее, чем метана из угольного пласта.

С другой стороны, при замерах давления метана в

угольных пластах требуется более длительный период для его нарастания до природной величины (особенно при замерах на высокометаморфизованных углях – тощих, антрацитах). Величина этого периода зависит от ряда природных и технологических факторов – от величин природного давления метана в пласте, природной метаноносности, влажности, газопроницаемости и петрографического состава углей и от его микроструктуры. Шахтными исследованиями установлено [1], что стабилизация давления метана в пласте на уровне 5% от природного происходит: на пластах низких степеней метаморфизма в течение 10-15 суток и на высокометаморфизованных пластах антрацита в течение 30-60 суток, что является удовлетворительным.

Поскольку $G^0 = H - TS + PV$, то из (1) при $c - c_0$ имеем:

$$c_0 = C_2 G^0 = C_2 (H - TS) + C_2 PV.$$

Таким образом, давление метана в пласте равно:

$$P = [c_0 - C_2 (H - TS)] / (C_2 V). \quad (2)$$

Уравнение (2) показывает сложную зависимость давления газа в пласте от его концентрации и свойств угольного вещества. Однако все параметры в (2) экспериментально определяемы, что важно с практической точки зрения. Видно, что с увеличением давления увеличивается метаноносность угля. Сказанное иллюстрирует таблица 2.

Таблица 2 – Давление метана и метаноносность на различных глубинах в шахтах Карагандинского угольного бассейна

Показатель	Единица измерения	Шахта			
		Абайская	Саранская	им. «Кос-тенко»	Стахановская
Глубина	м	370	510	610	680
Природное давление метана	Мпа	2,8	4,0	4,2	4,9
Метаноносность	м ³ /т	15,0	17,5	18,5	18,2

Мы воспользуемся полученным нами соотношением (2) и подходом, развитым в работе [2]. Пусть P – давление метана в порах, а P_m – внешнее (горное) давление на пласт. Для вычисления упругой энергии угольного каркаса авторы [2] применили следующий прием: мысленно разбиваем пласт на шарообразные области радиуса R_2 , содержащие полости радиуса R_1 , заполненные метаном. Затем вычисляется упругая энергия каркаса как сумма упругих энергий всех таких областей. Используя известное решение задачи о деформациях и напряжениях шара с концентрической шаровой полостью [3], подверженному действию внутреннего и внешнего давления, приходим к формуле для упругой энергии рассматриваемой области:

$$E_{el} = \frac{2\pi}{R_2^3 - R_1^3} \left[\frac{(PR_1^3 - P_m R_2^3)^2}{3K} + \frac{(P_m - P)^2 R_1^3 R_2^3}{4G} \right], \quad (3)$$

где K и G – модули всестороннего сжатия и сдвига соответственно.

Учитываем теперь, что отношение

$$\gamma = \frac{R_1^3}{R_2^2} \quad (4)$$

имеет четкий физический смысл пористости угля.

Тогда для плотности упругой энергии угля получим выражение, содержащее лишь хорошо определяемые в лабораторных и шахтных экспериментах параметры:

$$\varepsilon_{el}(P, P_m) = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left[\frac{(P_m - \gamma P)^2}{K} + \frac{3\gamma}{4G} (P_m - P)^2 \right]. \quad (5)$$

Поскольку ε_{el} через давление, она является упругой составляющей плотности термодинамического потенциала Гиббса газоугольного материала. Добавляя к ε_e плотность потенциала Гиббса газа, находящегося в порах, находится плотность φ потенциала Гиббса рассматриваемого угольно-газового массива:

$$\varphi(P, P_m) = \frac{1}{2(1-\gamma)} \left[\frac{(P_m - \gamma P)^2}{K} + \frac{3\gamma}{4G} (P_m - P)^2 \right] + \gamma P \ln \frac{P}{P_T}. \quad (6)$$

Здесь P_T – величина размерности давления, зависящая от температуры и рода газа.

Поскольку $\varphi = G^0/V$ и считая давление функцией пространственной координаты – $P(x)$, мы имеем уравнения (2) и (6), полностью определяющие равновесное давление в угольных пластах.

Из приведенных выше результатов наших исследований и других авторов вытекает следующая картина выхода метана из угольного пласта: на первой стадии инициируется распад углеметана на твердую и газообразную фазы; на второй стадии полученный при распаде газ, а также газ, адсорбированный в поровом пространстве угля диффундирует по системе трещин и открытых пор в скважинное пространство; на третьей стадии газ выходит на поверхность.

На первой стадии описание процесса распада твердого раствора углеметана осуществляется на основе нашей модели:

$$c = \frac{kT}{C_1} \cdot \frac{A}{G^0} \cdot c_0^2. \quad (7)$$

Здесь основную роль играет работа A внешних сил, определяющая в конечном счете саму возможность деструкции углеводорода и ее интенсивность.

На второй стадии процесс газопереноса сквозь угольный пласт к скважине описывается различными диффузионно-фильтрационными моделями, в которых делаются те или иные приближения.

Массоперенос метана по системе открытых каналов происходит путем фильтрации. Движущей силой процесса выступает градиент давления газа. Поскольку фильтрация – это безынерционный процесс, то для его описания применяется известное уравнение Дарси, которое в одномерном случае записывается так:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{k}{\mu} \cdot \rho \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \right]. \quad (8)$$

Здесь k – коэффициент проницаемости; μ – динамическая вязкость метана.

В случае вытеснения газа воздушным потоком в отточную скважину, описание процесса усложняется и уравнения фильтрации выглядят так:

$$\begin{aligned} n \frac{\partial c}{\partial t} &= \operatorname{div} \left[\frac{kT}{\mu n} c \operatorname{grad}(cR) \right] - W_m - W_o; \\ n \frac{\partial c_m}{\partial t} &= \operatorname{div} \left[\frac{kT}{\mu n} c_m \operatorname{grad}(cR) \right] - W_m; \\ n \frac{\partial c_o}{\partial t} &= \operatorname{div} \left[\frac{kT}{\mu n} c_o \operatorname{grad}(cR) \right] - W_o. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь W – скорость притока газа из пористых блоков в фильтрационный объем; индексы m и o относятся к метану и кислороду, соответственно.

На третьей стадии описание процесса выхода метана из угольного пласта на поверхность через скважину обычно описывается классической газодинамикой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айруни А.Т., Презент Г.М., Баймухаметов С.К. и др. Проблемы разработки метаноносных угольных пластов, промышленного извлечения и использования шахтного метана в Карагандинском угольном бассейне. М.: Изд-во Академии горных наук РФ, 2002. 318 с.
2. Алексеев А.Д., Фельдман Э.П. Равновесное распределение газов в угольных пластах // Письма в ЖТФ. 2008. Том. 34. Вып. 14. С. 48-53.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1965. 203 с.

ЭОЖ 622.271=512.122

ҚАПАСОВА А.З.

Ашық кеніш қиябеттерінің орнықтылығын есептеудің негіздері