

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ МЕТАНА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОРНОГО МАССИВА

Беспятов Г.А.

Кузбасский государственный университет

Кемерово, Россия

Для построения математической модели фазовых превращений метана примем во внимание, что образование метана в период накопления торфяника и постепенного погребения его под наносы последующих отложений происходило при температурах 150–300°C, когда сорбционная способность угля была близка к нулю. В дальнейшем, в процессе инверсии и понижении температуры, часть метана сорбировалась углем, часть оставалась в свободном состоянии как в трещинах и микропорах угля, так и в коллекторах вмещающих пород. Дальнейшее изменение термодинамических параметров угленосной толщи влекло за собой переход свободного газа в гидратированное состояние. Образование гидратов метана происходит либо при низких температурах ($t=12-14^\circ\text{C}$) при $P = 10$ МПа, либо при высоком гидростатическом давлении, большем чем в современных условиях. Например, для равновесного состояния гидрата метана. [1]

$$P^* = 1,415 + 0,0417 \left[(T^* - 273,16) + 0,01(T^* - 273,16)^2 \right]. \quad (1)$$

Образование гидратов в пористой среде при наличии центров кристаллизации имеет объемно-диффузионный характер. Одним из основных факторов, определяющих условия существования плотных гидратов в пористой среде, является упругость газа в водном растворе, находящемся в контакте с гидратом ρ_w и в гидрате ρ_H при заданной температуре. Величина ρ_H определяется составом гидрата и его температурой. Параметр ρ_w зависит от растворимости газа в воде при заданных давлении и температуре [2].

Условием существования гидрата является $\rho_w \geq \rho_H$. Растворимость газа в воде, находящейся в контакте с гидратом, всегда ниже, чем в отсутствие гидрата [2].

Степень газонасыщенности водного раствора, контактирующего с гидратом, определяется диффузионными потоками газа:

- а) потоком рассеяния в вышележащих горизонтах или в омывающие воды (D_1);
- б) потоком из нижележащих пластов (D_2).

Гидрат не будет диссоциировать при $D_2 \geq D_1$. Из этого условия следует, что чем глубже гидросодержащие породы, чем меньше и однороднее поры, тем ниже D_1 , а следовательно, тем выше возможность сохранения гидрата.

При изменении горнотехнических условий происходит понижение давления газа ниже давления разложения гидрата при существующей пластовой температуре, т.е. ρ_w становится меньше ρ_H ($\rho_w < \rho_H$), что вызывает диссоциацию гидратной фазы, т.е. газ переходит в свободное состояние и существенно изменяет газодинамику угленосной среды.

Для построения математической модели фазовых переходов метана выделим элементарный объем горного массива V , ограниченный поверхностью Γ . Будем предполагать, что в этом объеме газ находится в трехфазном состоянии (свободном, сорбированном и гидратном). Тогда масса газа, заключенного в этом объеме, в момент времени t будет равен

$$\int_{(V)} \rho_i(r, t) dV \quad (2)$$

где ρ_i – плотность газа в каждой фазе, $r(x_1, x_2, x_3)$ – радиус-вектор элемента объема dV .

В процессе движения из объема V через его границу Γ в единицу времени вытекает количество свободного газа, равное

$$\oint_{(\Gamma)} \rho_1 \cdot (V, n) d\Gamma \quad (3)$$

где ρ_1 – плотность свободного газа,

n – единичный вектор внешней нормали к поверхности Γ .

Тогда баланс газа за время dt будет

$$\int_{(V)} [r_i(r, t_2) - r_i(r, t_1)] dV + \oint_{(\Gamma)} r_1 \cdot (V, n) d\Gamma = 0. \quad (4)$$

Для течений, не имеющих сильных разрывов, интегральные уравнения заменим дифференциальными, описывающими процесс фазового перехода метана. Понижение давления до величины разложения гидрата определило подвижную границу диссоциации газа $\mathbf{x}(t)$.

В зоне I ($0 \leq x \leq \mathbf{x}(t)$) произошла десорбция газа и закончилось разложение гидрата и газ перешел в свободное состояние. В зоне II ($\mathbf{x}(t) \leq x < \infty$) процесс диссоциации еще не наступил и гидратная фаза сохраняется.

В одномерном случае процесс диссоциации описывается следующей краевой задачей

$$t < t_1, \quad \begin{cases} D \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + U \frac{\partial H}{\partial x} = m \frac{\partial H}{\partial t}, \\ D \frac{\partial H(0, t)}{\partial x} + UH(0, t) = 0, \\ H(x, t) = H_1. \end{cases} \quad (5)$$

$$t \geq t_1, x < \mathbf{x}(t), \quad \begin{cases} D \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + U \frac{\partial H_+}{\partial x} - \frac{\partial b}{\partial t} = m \frac{\partial H_+}{\partial t}, \\ \frac{\partial b}{\partial t} = -g(H_* - H_{(+)}). \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t) < x < \infty, \\ D \frac{\partial^2 H_{(-)}}{\partial x^2} + U \frac{\partial H_{(-)}}{\partial x} = m \frac{\partial H_{(-)}}{\partial t}, \\ \mathbf{x}(t_1) = 0, \\ D \frac{\partial H_{(+)}(0, t)}{\partial x} + UH_{(+)}(0, t) = 0, \\ H_{\pm}(x, t) = \mathbf{x}(t_1), \\ \frac{\partial H_{(+)}(S(t_1), t)}{\partial x} = \frac{\partial H_{(-)}(x(t_1), t)}{\partial x}, \\ b(x(t_1), t) = 0, \\ H_{(-)}(x, t_1) = H_{(+)}(x, t_1), \\ H(x, 0) = H_0. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь $H_{\pm} = \rho RT$ соответственно в зонах диссоциации и гидратирования,

$D = \lambda U$ - коэффициент конвективной диффузии, м²/сутки;

λ - параметр дисперсии, М;

$\gamma = \eta U$ - коэффициент гидратирования (диссоциации), сутки⁻¹;

η - константа скорости гидратирования, m^{-1} ;

t_1 – время окончания первой стадии, сутки.

Введем безразмерные координаты

$$Q = \frac{H}{H_1}, \quad n = \frac{b}{mH_1}, \quad z = hx, \quad t = \frac{h}{m} \int_0^t U(x) dx, \quad h = \Delta x, \quad \Delta t = \Delta t. \quad (8)$$

1. Рассмотрим стадию диссоциации газа в зоне $0 \leq x \leq x(t)$, $t < t_1$. Задача (5) в обозначениях (8) принимает вид

$$\begin{cases} e \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} + \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial q}{\partial t}, \\ e \frac{\partial q(0,t)}{\partial z} + q(0,t) = q_1, \\ q(z,0) = q_0(z). \end{cases} \quad (9)$$

Решение задачи (9) в виде составного разложения по степеням ϵ имеет вид [3]

$$q(z,t) = \sum_{i=0}^{\infty} \epsilon^{(i)} a_i(z,t) + \frac{1}{\epsilon} \exp\left(-\frac{z}{\epsilon}\right) \sum_{i=0}^{\infty} \epsilon^{(i)} k_i(z,t). \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9) и приравнивая члены при одинаковых степенях ϵ , получим

$$\frac{\partial a_0}{\partial t} - \frac{\partial a_0}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial a_i}{\partial t} - \frac{\partial a_i}{\partial z} = \frac{\partial^2 a_{i-1}}{\partial z^2}. \quad (11)$$

$$\frac{\partial k_0}{\partial t} + \frac{\partial k_0}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial k_i}{\partial t} + \frac{\partial k_i}{\partial z} = \frac{\partial^2 k_{i-1}}{\partial z^2}. \quad (12)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial k_0(0,t)}{\partial z} + a_0(0,t) = 0, \\ \frac{\partial k_i(0,t)}{\partial z} + a_i(0,t) = -\frac{\partial a_{i-1}(0,t)}{\partial z}, \\ k_{i-1}(z,0) = 0, \\ k_{i-1}(h,t) = 0. \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} a_0(z,0) = q_0(z), \\ a_i(z,0) = 0, \\ a_0(h,t) = q_1, \\ a_i(h,t) = 0 \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \end{cases} \quad (14)$$

Решая (11)-(14) методом характеристик, найдем

$$\begin{cases} a_0 = \begin{cases} q_1 & (h-t \leq z < h) \\ q_0(z+t) & (0 \leq z < h-t), a_i = 0 \end{cases} \\ k_0 = \begin{cases} \int_0^{t-z} q_0(z) dz & (z \leq t) \\ 0 & (z > t). \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

Если $q_0(z) = q_0 = const$, то $k_i = 0$. При $q_0(z) \neq const$ функция $k_i(z, t)$ определяется из (12), (13) при конкретном задании функции $q_0(z)$.

Так как $\theta_1 > \theta_0(h)$, то на характеристике $z = h - t$ функция $a_0(z, t)$ терпит разрыв, т.е. разложение решения задачи (11) в виде (12) справедливо всюду, за исключением окрестности характеристики $X = h - t$. В работе [3] приведено решение данной задачи в виде

$$q(m, t) = q_1 - \frac{1}{2}(q_1 - q_0(h)) \operatorname{erf} j_0, \quad \text{где } m = \frac{(z+t-h)}{\sqrt{e}}, \quad j_0 = \frac{(z+t-h)}{2\sqrt{te}}. \quad (16)$$

Общее решение, справедливое во всей области фазовых превращений метана, можно получить методом аддитивного составления [3]

$$q(z, t) = \begin{cases} q_0(z+t) + \frac{1}{e} \exp\left(-\frac{z}{e}\right) \int_0^{t-z} q_0(z) dz & (z < t) \\ q_0(z+t) + 0,5[q_1 - q_0(h)] \operatorname{erfc}(-j_0) & (t < z < h-t) \\ q_1 - 0,5[q_1 - q_0(h)] \operatorname{erfc} j_0. & (h-t < z \leq h) \end{cases} \quad (17)$$

Формула (17) справедлива при $\frac{dh}{dt} < 1$.

При $q_0(z) = q_0 = const$ и $h \rightarrow \infty$ из (17) имеем

$$q = q_0 \left[1 + \frac{(t-z)}{e} \exp\left(-\frac{z}{e}\right) \right] \quad (z \leq t), \quad q = q_0 \quad (z > t) \quad (18)$$

При этих условиях точное решение задачи (11) получено в виде

$$\frac{q}{q_0} = 1 + 0,5 \exp\left(-\frac{z}{e}\right) \left[4i^2 \operatorname{erfc} j_2 + 2j_1 i \operatorname{erfc} j_2 - \exp\left(\frac{z}{e}\right) \operatorname{erfc} j_1 \right]. \quad (19)$$

Незначительное различие точного (19) и приближенного решения (18) указывает на эффективность приближенных методов для решения данной задачи.

Из анализа полученного решения можно определить подвижную границу диссоциации газа $X(t)$. Граница $X(t)$ движется противоположно направлению фильтрации. При большой скорости ведения горных работ граница $X(t)$ может приближаться к кромке пласта. Для приблизительной оценки величины $X(t)$ предположим, что давление на границе зоны диссоциации совпадает с

давлением свободного газа в начальный период разложения гидрата, т.е. $q(x, t) = q_0$, тогда уравнение баланса газа на границе $x(t)$ можно представить в виде

$$\frac{q_2 - q_0}{x(t)} = v(e, t) = \frac{Wm_r P_0}{P^*(T)} \frac{\partial x}{\partial t}, \quad (20)$$

где $P^*(T)$ определяется по формуле (1). Разделяя переменные в уравнении (20), найдем

$$x(t) = \sqrt{\frac{2(q_2 - q_0)}{Wm_r P_0} \sqrt{t} + x_0^2}. \quad (21)$$

Из формулы (21) следует, что гидратное давление q_2 снижается довольно резко до некоторого значения, соответствующего разложению гидрата, что свидетельствует о быстром его разложении и незначительных размерах зоны диссоциации ($x_0 < x(t) < x_{пред.}$).

Расчеты по формуле (21) показывают, что зона диссоциации находится в зоне упругих деформаций угольного пласта. Этот факт говорит о том, что в этой области происходит начальный рост концентрации газа. Общее количество диссоциированного газа будет

$$V(t) = \frac{2(q_2 - q_0)}{\sqrt{p} a_0} \cdot \sqrt{t}. \quad (22)$$

Исходя из формулы состава кристаллогидрата ($CH_4 \cdot 5,75 \cdot H_2O$) и с учетом выражения (22) можно определить массу газа и число объемов газа в одном объеме гидрата. Например, для $P_0 = 1$ МПа, $\tau = 0$ °С. Число объемов газа в единице объема гидрата составляет 101,44 кг/м³. Таким образом, один объем гидрата содержит более сотни объемов газа, это свидетельствует о том, что гидраты (особенно метана) отличаются значительными запасами внутренней энергии и высокой концентрацией газа. Следовательно, зоны разложения гидрата являются зонами повышенной газодинамической активности пласта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Веригин Н.Н. О разложении гидрата газа в пласте. //МЖГ.- 1982 - №4.-с.171 -173.
 2. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов.- М.: Недра,1974.
- Ван-Дайк М. Методы возмущений в механике жидкости. М., Мир, 1967.