УДК 532.546:536.421

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В ПОРИСТЫХ ПЛАСТАХ

ЗАПИВАХИНА М.Н.
Бирская государственная социально-педагогическая академия, г. Бирск, Россия
zapivakhina-marina@rambler.ru

NUMERICAL ANALISIS OF GAS HYDRATE'S DISSOSIATION IN POROUS MEDIUM

ZAPIVAKHINA M.N.
Бирская государственная социально-педагогическая академия, г. Бирск, Россия
Birsk state social- pedagogical academy, Birsk, Russian
zapivakhina-marina@rambler.ru

В плоскоодномерной автомодельной постановке изучен процесс разложения газогидрата при инжекции газа в пористую среду в рамках фронтальной схемы. Проанализировано влияние параметров пористой среды, давления и температуры нагнетаемого газа на протяженность области разложения газогидрата в пористом пласте.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из альтернативных источников энергии являются газогидраты – принципиально новый вид топлива, покоящегося на дне морей и в зонах вечной мерзлоты. Потенциальные запасы метана в газогидратах оцениваются специалистами до $2*10^{16}$ м^3 [1]. При этом в одном кубометре природного газогидрата содержится до 180 м^3 газа и 0,78 м^3 воды [2].

Представляется, что извлечение газа из состава газогидратных массивов возможно путем инжекции теплого газа или воды в пористый пласт. В данной работе в плоскоодномерном и осесимметричном приближениях рассматривается задача о разложении газогидрата при нагнетании в пористую среду газа одноименного исходному.

1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Для описания процессов тепломассопереноса при закачке газа в пористый пласт примем следующие допущения. Процесс однотемпературный, т.е. температура пористой среды и насыщающего вещества (газа, гидрата или воды) одинаковы. Гидрат представляет собой двухкомпонентную систему с массовой концентрацией газа G. Газ будем считать калорически совершенным, скелет пористой среды, газогидрат и вода несжимаемы и неподвижны, пористость постоянна:

$$\rho_{sk}, \rho_h, \rho_l, m = const$$
$$p = \rho_g R_g T,$$

здесь $\rho_j \, (j - sk, h.l)$ – истинные плотности фаз; m – пористость; p – давление; T – температура; R_g – газовая постоянная; индексы $sk, h.l, g$ соответствуют параметрам скелета, гидрата, воды и газа.

С учетом принятых допущений уравнение сохранения массы газа запишем в виде [3,4]

$$\frac{\partial}{\partial t}(mS_g\rho_g) + \frac{\partial}{\partial x}(mS_g\upsilon_g\rho_g) = 0 \qquad (1.1)$$
$$S_g + S_l + S_h = 1,$$

где $S_j \, (j - sk, h.l)$ – насыщенность пор j-фазы; υ_g – скорость газовой фазы.

Процесс фильтрации газа подчиняется закону Дарси

$$mS_g\upsilon_g = -\frac{k_g}{\mu_g}\frac{\partial p}{\partial x}\ . \qquad (1.2)$$

Пренебрегая баротермическим эффектом, уравнение притока тепла запишем в виде

$$\begin{gathered}\rho c\frac{\partial T}{\partial t} + \rho_g c_g mS_g\upsilon_g\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda\frac{\partial T}{\partial x})\\ \rho c = (1-m)\rho_{sk}c_{sk} + m\sum_{j=sg,l,h}S_j\rho_j c_j\quad ,\\ \lambda = (1-m)\lambda_{sk} + m\sum_{j=g,l,h}S_j\lambda_j\end{gathered} \qquad (1.3)$$

здесь $\rho\tilde{n},\lambda$ – удельная объемная теплоемкость и теплопроводность системы; c_j,λ_j – удельная теплоемкость и теплопроводность фаз. Во всем пласте величины ρc и λ будем полагать постоянными, поскольку основной вклад в эти величины вносят параметры скелета пористой среды.

Зависимость коэффициента проницаемости для газа k_g от «живой» пористости mS_g будем задавать на основе формулы Козени [5]. Тогда для зависимости проницаемости от газонасыщенности будем иметь

$$k_g = k_*\frac{(mS_g)^3}{(1-mS_g)^2} \approx k_0 S_g^3\quad (k_0 = k_* m^3)\,, \qquad (1.4)$$

где k_0 – соответствует проницаемости «чистого» скелета.

Температура и давление в области разложения гидрата связаны условием фазового равновесия [2]

$$T = T_0 + T_*\ln(\frac{p}{p_{s0}})\,, \qquad (1.5)$$

где T_0, p_{s0} – начальная температура системы и соответствующее ей равновесное давление; T_* – эмпирический параметр, зависящий от вида газогидрата.

В данном случае при разложении газогидрата в пористом пласте возникают две характерные области: ближняя и дальняя. В области, находящейся вблизи границы (ближней области), поры заполнены газом и водой. В дальней области присутствуют газ и гидрат. На границе этих областей должны выполняться условия баланса массы и тепла [3]:

$$\begin{gathered}\left[m(S_h\rho_{h)}(1-G) + S_l\rho_l)\dot{x}_{(i)}\right] = 0\\ \left[m(\rho_g S_g(\upsilon_g - \dot{x}_{(i)}) - \rho_h S_h G\dot{x}_{(i)})\right] = 0\\ \left[\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right] = \left[m\rho_h L_h S_h\dot{x}_{(i)}\right],\end{gathered} \qquad (1.6)$$

здесь $[\psi]$ – скачок параметра ψ на границе $x = x_{(s)}$ между областями; $\dot{x}_{(s)}$ – скорость движения этой границы. Температуру и давление на границе будем полагать непрерывными.

Будем полагать, что пласт в начальный момент времени насыщен газом и газогидратом $S_h = S_{h0}$ при давлении p_0 и температуре T_0.

$$\begin{gathered}t = 0:\ S_h = S_{h0}, T = T_0\\ p = p_0\ (x \geq 0)\end{gathered} \qquad (1.7)$$

Пусть через границу закачивается газ (одноименный исходному) с температурой T_e при постоянном давлении p_e. Тогда граничное условие имеет вид:

$$x = 0:\ T = T_e,\ \ p = p_e\ (t > 0)\,. \qquad (1.8)$$

2. РЕШЕНИЯ В БЛИЖНЕЙ И ДАЛЬНЕЙ ОБЛАСТЯХ

Сформулированные задачи имеют автомодельные решения. Введем автомодельную переменную $\xi = x/\sqrt{\aleph^{(T)} t}$, $(\aleph^{(T)} = \lambda/\rho c)$, где $\aleph^{(T)}$ – температуропроводность пласта.

Уравнение (1.2) может быть проинтегрировано с учетом начального условия для S_h. В результате получаем следующие кинематические зависимости

$$S_h = S_{h0} - \frac{\rho_l}{\rho_h(1-G)} S_l,\ S_g = 1 - S_{h0} + (1 - \frac{\rho}{\rho_h(1-G)}) S_l \qquad (2.1)$$

Полагая $S_h = 0$, для ближней области $(0 \le x \le x_{(n)})$, имеем

$$S_{le} = \frac{\rho_h(1-G)S_{h0}}{\rho_l},\ S_{ge} = 1 - S_{le}\ . \qquad (2.2)$$

С учетом соотношений (1.1) − (1.3) уравнения температуропроводности и пьезопроводности могут быть записаны в виде

$$-\frac{1}{2}\xi\frac{dT_{(1)}}{d\xi} = \frac{1}{2}\frac{Pe_{(i)}}{p_0^2}\frac{dp_{(i)}^2}{d\xi}\frac{dT_{(i)}}{d\xi} + \frac{1}{\xi}\frac{d}{d\xi}(\xi\frac{dT_{(i)}}{d\xi})$$
$$-\xi\frac{dp_{(i)}^2}{d\xi} = 2\eta_{(i)}\frac{1}{\xi}\frac{d}{d\xi}(\xi\frac{dp_{(i)}^2}{d\xi}), \qquad (2.3)$$

где $\eta_{(i)} = \frac{\aleph_{(i)}^{(p)}}{\aleph^{(T)}}, \aleph_{(i)}^{(p)} = \frac{k_{(i)}p_0}{mS_{g(i)}\mu_g}, Pe_{(i)} = \frac{\rho_{g0}c_g}{\lambda}\frac{k_{(i)}p_0}{\mu_g}, k_{(i)} = k_0 K_{(i)}, K_{(i)} - S_{g(i)}^3$

нижние индексы в скобках $i = 1, 2$ соответствуют параметрам первой и второй областей.

На поверхности, разделяющей ближнюю и дальнюю области, происходит скачок гидратонасыщенности $S^-{}_h = 0$ до $S^+{}_h = S_{h0}$. На границе между этими областями давление и температура связаны условием фазового равновесия (1.5).

Используя соотношения (1.6), систему уравнений для определения автомодельной координаты ξ границы фазовых переходов и значений параметров на ней запишем в виде

$$K_{(1)}\frac{dP_{(1)}}{d\xi} - K_{(2)}\frac{dP_{(2)}}{d\xi} = -(1 - \frac{G}{\tilde{\rho}_{g0}}\frac{\vartheta_{(1)}}{p_{(1)}} - \frac{1-G}{\bar{\rho}_l})\frac{S_{h0}\xi_{(n)}S_{ge}^2}{2\eta_{(i)}}$$
$$\frac{d\vartheta_{(2)}}{d\xi} - \frac{d\vartheta_{(1)}}{d\xi} = m\bar{\rho}_h J_{ah}\ \frac{S_{h0}}{2}\xi_{(s)} \qquad (2.4)$$
$$\bar{\rho}_h = \rho_h/\rho,\ \bar{\rho}_{g0} = \rho_{g0}/\rho_h, J_{ah} = L_h/cT_0,$$

Здесь $P = p/p_0$ − безразмерное давление, $\vartheta = T/T_0$ − безразмерная температура.

Проинтегрировав уравнения (2.3) с учетом начальных и граничных условий для безразмерных давления и температуры в каждой из областей, получаем

$$P_{(1)}^2 = P_{(s)}^2 + \frac{(P_e^2 - P_{(s)}^2)\int_{\xi}^{\xi_{(s)}}\exp(-\frac{\xi^3}{4\eta_{(1)}})d\xi}{\int_0^{\xi_{(s)}}\exp(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{Pe_{(1)}P_{(1)}^2}{2})d\xi}$$

$$\theta_{(1)} = \theta_{(s)} + \frac{(\theta_e - \theta_{(s)})\int_{\xi}^{\xi_{(s)}}\exp(-\frac{\xi^3}{4\eta_{(1)}} - \frac{Pe_{(1)}P_{(1)}^2}{2})d\xi}{\int_0^{\xi_{(s)}}\exp(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{Pe_{(1)}P_{(1)}^2}{2})d\xi} \qquad (2.5)$$

$$P_{(2)}^2 = 1 + \frac{(P_{(s)}^2 - 1)\int\limits_{\xi}^{\infty} \exp(-\frac{\xi^3}{4\eta_{(2)}})d\xi}{\int\limits_{\xi_{(s)}}^{\infty} \exp(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}})d\xi}$$

$$\theta_{(2)} = 1 + \frac{(\theta_{(s)} - 1)\int\limits_{\xi}^{\infty} \exp(-\frac{\xi^3}{4} - \frac{Pe_{(2)}P_{(2)}^2}{2})d\xi}{\int\limits_{\xi_{(s}}^{\xi\infty} \exp(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{Pe_{(2)}P_{(2)}^2}{2})d\xi} \quad . \qquad (2.6)$$

После подстановки в систему граничных условий (2.4) решений (2.5), (2.6)) она принимает вид

$$k_{(2)}(1 - P_{(s)}^2)\frac{\exp(-\frac{\xi^3}{4\eta_{(2)}})}{\int\limits_{\xi_{(s)}}^{\infty} \exp(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}})d\xi} - k_{(1)})(P_e^2 - P_{(s)}^2)\frac{\exp(-\frac{\xi_{(s)}^2}{4\eta_{(1)}})}{\int\limits_{0}^{\xi_{(s)}} \exp(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(1)}})d\xi} = -KS_{ho}\xi_{(s)}^2 \qquad (2.7)$$

$$\left(\theta_{(s)} - \theta_e\right)\frac{\exp\left(-\frac{\xi_{(s)}^2}{4} - \frac{Pe_{(1)}P_{(1)}^2}{2}\right)}{\int\limits_0^{\xi_{(s)}} \frac{1}{\xi}\exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{Pe_{(1)}P_{(1)}^2}{2}\right)d\xi} - \left(1 - \theta_{(s)}\right)\frac{\exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{Pe_{(2)}P_{(2)}^2}{2}\right)}{\int\limits_{\xi_{(s)}}^{\infty} \frac{1}{\xi}\exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{Pe_{(2)}P_{(2)}^2}{2}\right)d\xi} =$$

$$= -\frac{\Delta TSh_0}{2}\xi_{(s)}$$

$$(\theta_{(s)} - \vartheta_e) + \frac{\exp(-\frac{\xi_{(S)}^2}{4} - \frac{Pe_{(1)}P_{(1)}^2}{2})}{\int\limits_0^{\xi_{(s)}} \exp(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{Pe_{(1)}P_{(1)}^2}{2})d\xi} - (1 - \theta_{(s)})\frac{\exp(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{Pe_{(2)}P_{(2)}^2}{2})}{\int\limits_{\xi_{(s)}}^{\infty} \exp(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{Pe_{(2)}P_{(2)}^2}{2})d\xi} = -\frac{\Delta TS_{h0}}{2}\xi_{(s)}.$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Результаты численных расчетов показали, что область разложения газогидрата увеличивается по мере роста граничной температуры и проницаемости среды. С повышением же давления закачиваемого газа зона разложения гидрата уменьшается. Это объясняется тем, что с увеличением граничного давления растет давление на фронте разложения и, следовательно, равновесная температура разложения гидрата. Подводимое тепло при этом в большей степени расходуется на нагрев пористой среды до температуры разложения гидрата. Это соответственно приводит к уменьшению скорости разложения газогидрата и сокращению расплавленной области.

Также было замечено, что более интенсивное разложение газогидрата в пласте наблюдается при небольшой исходной гидратонасыщенности пласта. Из рисунка также видно, что при малой начальной гидратонасыщенности образуется плато, что свидетельствует о конвективном переносе тепла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено численное моделирование процесса нагнетания газа в пористый пласт, сопровождающегося разложением газогидрата. Установлено, что в рамках поставленной задачи разложение газогидрата происходит только на фронтальной поверхности. Анализ результатов численных расчетов показывает, что с ростом проницаемости пласта и температуры закачиваемого газа протяженность области разложения гидрата увеличивается, а с увеличением гидратонасыщенности и давления инжектируемого газа - уменьшается. Увеличение граничного давления приводит к росту давления на фронте разложения и, следовательно, равновесной температуры разложения гидрата. Подводимое тепло при этом в большей степени расходуется на нагрев пористой среды до температуры разложения гидрата. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению скорости разложения газогидрата и сокращению расплавленной области.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Истомин В.А., Якушев В.С.* Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992.
2. *Бык С.Ш., Макагон Ю.Ф., Фомина В.И.* Газовые гидраты. М.: Химия, 1980.
3. *Нигматулин Р.И., Шагапов В.Ш., Сыртланов В.Р.* Автомодельная задача о разложении газогидратов в пористой среде при депрессии и нагреве // ПМТФ. 1998. Т.39. № 3. С. 111-118.
4. *В. И. Васильев, В. В. Попов, Г. Г. Цыпкин.* Численное исследование разложения газовых гидратов, сосуществующих с газом в природных пластах// Изв. РАН. МЖГ. 2006. № 4. С. 127-134.
5. *Лейбензон А.С.* Движения природных и газов в пористой среде. М.: ОГИЗ, 1947.
6. *Гумеров Н.А.* Автомодельный рост газового гидрата, разделяющего газ и жидкость // Изв. РАН. МЖГ. 1992. № 5. С. 78-85.
7. *Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М.* Движение жидкостей и газов в пористых пластах. М.: Недра. 1984.
8. *Ландау Л.Д. Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т.6. Гидродинамика. М.: Наука. 1986. 736 с.
9. *Шагапов В.Ш., Мусакаев Н.Г., Хасанов М.К.* Нагнетание газа в пористый резервуар, насыщенный газом и водой // Теплофизика и аэромеханика, 2005. Т. 12. № 4. С. 645-656.