

# АВТОМОДЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАМЕЩЕНИЯ МЕТАНА ЖИДКИМ ДИОКСИДОМ УГЛЕРОДА В ГАЗОГИДРАТНОМ МАССИВЕ

Белова С.В.<sup>1</sup>, преподаватель колледжа

Дударева О.В.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., доцент

Чиглинцева А.С.<sup>1,2</sup>, д.ф.-м.н., доцент

<sup>1</sup>Бирский филиал УУНиТ, г. Бирск, Россия

<sup>2</sup>УГНТУ, г. Уфа, Россия

**Аннотация.** В работе теоретически исследован процесс замещения метана жидким диоксидом углерода в газогидратном массиве при отрицательных температурах. На основе автомоделного подхода построены аналитические решения для полей температуры и давления, учитывающие движение фронта фазового перехода. Установлено, что повышение давления нагнетаемого диоксида углерода приводит к увеличению протяжённости зоны, занятой гидратом CO<sub>2</sub>, и, соответственно, к более глубокому проникновению фронта замещения в исходный метангидратный пласт.

**Ключевые слова:** гидрат, процесс замещения, диоксид углерода.

Газогидратные залежи являются серьезной альтернативой традиционным ресурсам природного газа[1-2]. В связи с этим актуальной представляется задача о вытеснении метана из гидратов в результате замещения его другим газом. Из экспериментальных данных других исследователей известно, что для осуществления такой реакции замещения целесообразнее использовать диоксид углерода в жидком виде[3]. Осуществление технологии такого замещения позволит совместить добычу природного газа и одновременно произвести утилизацию углекислого газа, обладающего парниковым эффектом.

Пусть горизонтальный массив, в начальный момент времени насыщен гидратом  $S_{hm0}$  (образованным из снега и метана) и метаном  $S_{gm0}$  при

отрицательной температуре  $T_0$  и давлении  $p_0$ , которые соответствуют условиям стабильного существования газогидрата метана. Полагаем, что через границу ( $x=0$ ) закачивается жидкий диоксид углерода при температуре  $T_e$  и давлении  $p_e$ , которые соответствуют условия фазового равновесия системы и поддерживаются постоянными на этой границе [4]. Для определения зависимости равновесной температуры  $T_s(p)$  от текущего значения давления примем выражение

$$T_s(p) = T_{(s_0)} + T_* \ln(p / p_{(s_0)}) \quad (1)$$

где  $T_{(s_0)}$ ,  $p_{(s_0)}$  – равновесные значения температуры и давления,  $T_*$  – эмпирический параметр.

В основе модели лежит представление о движущейся фронтальной границе  $x=s(t)$ , которая служит поверхностью замещения и разделяет массив на две характерные зоны. В прискважинной области ( $0 < x < s(t)$ ) поровое пространство занято жидкой двуокисью углерода и образующимся из неё гидратом. Удалённая область ( $x > s(t)$ ), напротив, содержит метан и его гидратное соединение. Для идентификации параметров, относящихся к каждой из этих зон, вводятся следующие нижние индексы:  $i=d$ – для ближней (диоксид углерода),  $i=m$ – для дальней (метан).

На основе уравнения баланса масс для каждой из фаз, уравнения баланса энергии и линейного закона Дарси получим уравнения пьезопроводности и температуропроводности в безразмерных переменных для каждой из зон:

$$\frac{\partial P_i}{\partial t} = \chi_i^p \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial P_i}{\partial x} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \chi^T Pe_d \frac{\partial p_i}{\partial x} \frac{\partial T_i}{\partial x} + \chi^T \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2}, \quad (3)$$

где

$$Pe_d = \frac{\rho_{0d} c_d}{\lambda} \frac{k_d}{\mu_d \beta}, \quad Pe_m = \frac{\rho_{0m} c_m}{2\lambda} \frac{k_m p_0}{\mu_m}, \quad \chi_0^p = \frac{k_{ld}}{S_{ld} \mu_{ld} \beta}, \quad \chi_0^p = \frac{k_{gm} p_{m0}}{S_{gm0} \mu_{gm0}}, \quad \varphi = \chi^T / 4 \chi_0^p,$$

$$\chi^T = \frac{\lambda}{\rho c}.$$

Отметим, что  $\mu_i$  – динамическая вязкость газа,  $k_i$  – коэффициент проницаемости газа,  $\beta$  – изотермический коэффициент объёмного сжатия жидкой двуокиси углерода,  $c_i$  – удельная массовая теплоемкость  $i$ -ой фазы,  $\rho c$  – удельная объемная теплоемкость,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности системы.

Граничные и начальные условия запишем в следующем виде:

$$t = 0 (x \geq 0): S_g = S_{gm0}, S_h = S_{hm0}, T = T_0, p = p_0, \quad (4)$$

$$x = 0 (t > 0): T = T_e, p = p_e, \quad (5)$$

$$x = \infty (t > 0): T = T_0, p = p_0. \quad (6)$$

Для сведения исходной системы уравнений в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений воспользуемся предположением об автомодельности течения. Введём автомодельную (подобную) переменную  $\xi$  согласно соотношению  $\xi = x_s / 2\sqrt{\chi_0^p t}$ .

Решая систему уравнений (2) – (6) в автомодельных переменных, получим соотношения для распределения давления и температуры в каждой из областей.

$$P_d = P_{sd} + (P_e - P_{sd}) \frac{\int_{\xi_s}^{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{\eta}\right) d\xi}{\int_0^{\xi_s} \exp\left(-\frac{\xi^2}{\eta}\right) d\xi}, \quad (7)$$

$$T_d = T_s + (T_e - T_s) \frac{\int_{\xi_s}^{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\varphi} - Pe_d P_d\right) d\xi}{\int_0^{\xi_s} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\varphi} - Pe_d P_d\right) d\xi}, \quad (8)$$

$$P_m = 1_0 + (P_{sm} - 1) \frac{\int_{\xi_s}^{\infty} \exp(-\xi^2) d\xi}{\int_{\xi_s}^{\infty} \exp(-\xi^2) d\xi}, \quad (9)$$

$$T_m = T_0 + (T_s - T_0) \frac{\int_{\xi_s}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\varphi} - Pe_m P_m\right) d\xi}{\int_{\xi_s}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\varphi} - Pe_m P_m\right) d\xi}, \quad (10)$$

Теплофизические параметры газа, льда, воды и гидрата определены следующими значениями:  $G_m = 0.12$ ,  $G_d = 0.28$ ,  $R_g = 520$  [Дж/(кг·К)],  $\rho_{0d} = 890$  [кг/м<sup>3</sup>],  $\rho_{hm} = 900$  [кг/м<sup>3</sup>],  $\rho_{hd} = 1100$  [кг/м<sup>3</sup>],  $k_0 = 10^{-16}$  [м<sup>2</sup>],  $c_{gm} = 1560$  [Дж/(кг·К)],  $c_{ld} = 2600$  [Дж/(кг·К)],  $c_{hm} = 2050$  [Дж/(кг·К)],  $c_{hd} = 2500$  [Дж/(кг·К)],  $\mu_d = 10^{-4}$  [Па·с],  $\mu_m = 10^{-5}$  [Па·с],  $\lambda_{hm} = 0.5$  [Вт/(м·К)],  $\beta = 10^{-8}$  [Па<sup>-1</sup>],  $l_{hd} = 1.5 \cdot 10^5$  [Дж/кг] (при  $T < 0^\circ\text{C}$ ),  $l_{hm} = 1.45 \cdot 10^5$  [Дж/кг] (при  $T < 0^\circ\text{C}$ ).

Для равновесной температуры и соответствующего давления, а также эмпирического параметра, входящих в формулу (1) были приняты следующие значения: а) условие фазового равновесия для СН<sub>4</sub>:  $T_{(s0)} = 263$  [К],  $p_{(s0)} = 1.86$  [МПа],  $t_* = 30$  [К]; б) условие фазового равновесия для СО<sub>2</sub>:  $T_{(s0)} = 263$  [К],  $p_{(s0)} = 0.67$  [МПа],  $T_* = 16$  [К].

Для температуры, давления и насыщенности гидрата метана, характеризующих начальное состояние системы «газ + гидрат метана», принимались соответственно следующие значения:  $T_0 = 233$  [К],  $p_0 = 1.5$  [МПа],  $S_{hm} = 0.3$ .

На рис. 1 представлены распределения полей температуры (а) и давления (с) в массиве при различных давлениях нагнетаемого жидкого диоксида углерода  $p_e$ , справа расположены увеличенные фрагменты распределения температуры (б) и давления (д). На рисунке пунктирной линией представлены значения подвижной границы  $\xi_s$  для соответствующих значений давления нагнетаемого диоксида углерода. При нагнетаемых значениях давлений  $p_0 = 2$  [МПа],  $p_0 = 3$  [МПа],  $p_0 = 5$  [МПа] подвижная граница принимает значения  $\xi_s = 0.034$ ,  $\xi_s = 0.084$ ,  $\xi_s = 0.166$ , соответственно. Из графиков видно, что с увеличением давления, при котором нагнетается диоксид углерода в газогидратный массив, увеличивается протяженность области насыщенной гидратом СО<sub>2</sub>.

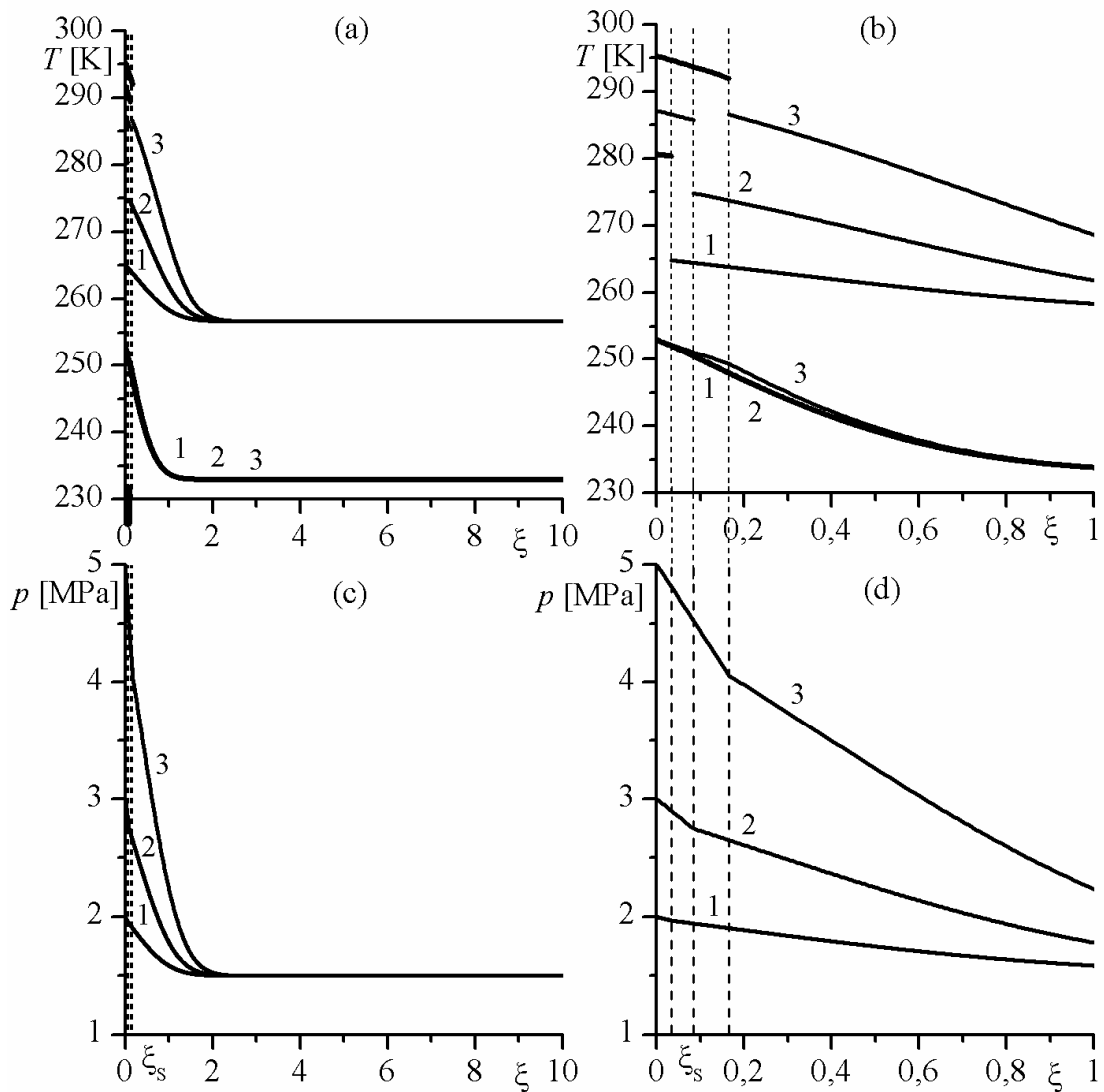


Рис. 1. Распределения температуры (a, b) и давления (c, d) в массиве при различных давлениях нагнетаемого жидкого диоксида углерода  $p_e$ : 1—при  $p_e=2$  [MPa], 2— $p_e=3$  [MPa] и 3— $p_e=5$  [MPa] от безразмерной автомодельной переменной  $\xi$ .

Выполнено теоретическое исследование процесса вытеснения метана из гидратосодержащего массива путём нагнетания жидкой двуокиси углерода при отрицательных температурах, то есть ниже точки замерзания поровой воды. В рамках модели построены автомодельные решения, описывающие пространственно-временное распределение температурного поля и поля давления. Проведён анализ влияния варьируемых параметров задачи на процесса замещения. Установлено, что с ростом давления нагнетаемого

диоксида углерода закономерно увеличивается зона, в которой формируется гидрат углекислого газа. Иными словами, повышение нагнетательного напора способствует более глубокому проникновению фронта замещения в исходный метангидратный пласт.

### Литература

1. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. –М.: Недра, 1974.
2. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992. 236 с.
3. Воронов В.П., Городецкий Е.Е., Григорьев Б.А., Муратов А.Р. Экспериментальное исследование процесса замещения метана в газовом гидрате диоксидом углерода // Вести газовой науки. Научно-технический сборник, 2015. – № 4 (24). – С. 235–248.
4. Belova S.V., Chiglintseva A.S., Khasanov M.K., Dudareva O.V., Shagapov V.Sh. // Simulation of CH<sub>4</sub> recovery from hydrate deposits by injection of CO<sub>2</sub>. Thermal Science, 2019. Vol. 23, Suppl. 2, P. S447-S45