

# ОБРАЗОВАНИЕ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПРИ ИНЖЕКЦИИ ХОЛОДНОГО ГАЗА

И.К. Гималтдинов, М.К. Хасанов, М.В. Столповский

Численно исследуется процесс образования газогидрата в пористой среде, в начальный момент насыщенной газом и водой, при инъекции холодного газа. Получена система дифференциальных уравнений второго порядка, описывающая распределение основных параметров пласта в автомоделном приближении. В результате численного решения системы методом Рунге – Кутты получены распределения давления и температуры в пласте, а также установлено, что образование газогидрата может происходить как на фронтальной поверхности, так и в протяженной области.

## Введение

Многие технологические процессы в нефтегазовой отрасли сопровождаются образованием газовых гидратов, как в самом пласте, так и в системах подземного и наземного оборудования нефтяных и газовых месторождений. Например, при освоении газовых (нефтяных) месторождений в полярных районах и глубоководном шельфе, возможно образование газовых гидратов в при забойной зоне газодобывающих скважин или в самих скважинах. Причем, эти явления могут привести к существенному снижению проницаемости пластов и пропускной способности скважин. Для ликвидации гидратных пробок необходимы большие затраты (до 20% стоимости добычи газа).

Однако процессы гидратообразования могут иметь и положительный аспект. Процессы техногенного гидратообразования могут быть использованы в различных областях промышленности для решения следующих задач: опреснение морской воды, разделение водных растворов, аккумулялирование тепла, холодильные циклы, хранение и разделение газов и многих других.

В данной работе рассматриваются некоторые особенности образования гидрата при нагнетании газа в пористый пласт, насыщенный в исходном состоянии газом и водой. При описании процесса образования газового гидрата в результате закачки газа в пласт принимают обычные для теории фильтрации закономерности. Однако, в отличие от обычной задачи фильтрации, сопровождаемой фазовыми переходами, следует вводить подвижные границы фазового перехода, и, соответственно, области, в которых гидрат может находиться в стабильном состоянии в равновесии с продуктами разложения (газом и жидкостью) и вообще отсутствовать.

Пусть полубесконечный пористый пласт в начальный момент времени насыщен газом и водой, давление и температура которых соответствуют термодинамическим условиям существования газа в свободном состоянии. Предположим, что через границу пласта закачивается холодный газ, температура и давление которого соответствуют условиям образования газогидрата и далее поддерживаются постоянными. Тогда от границы вглубь пласта начинает распространяться фронт образования гидрата, разделяющий пласт на две области. В первой области, находящейся вблизи границы пласта вода полностью перешла в гидратное состояние, поэтому в порах присутствует только газ и газогидрат. Во второй, дальней области, поры заполнены газом и водой. Таким образом, полагаем, что образование газогидрата происходит на фронтальной границе между этими областями.

## Основные уравнения

При описании происходящих процессов примем следующие допущения: скелет пористой среды, газогидрат и вода несжимаемы и неподвижны, пористость постоянна,

температура пористой среды и насыщающего вещества (газа, гидрата, воды) совпадают. Гидрат является двухкомпонентной системой с массовой концентрацией газа  $g$ .

В рамках принятых допущений уравнение сохранения массы газа имеет вид:

$$mS_{g(i)} \frac{\partial \rho_{g(i)}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (mS_{g(i)} \rho_{g(i)} v_{g(i)}) = 0, \quad (1)$$

где  $m$  - пористость,  $S_{g(i)}$  - газонасыщенность.

В качестве закона фильтрации газа примем закон Дарси:

$$mS_{g(i)} v_{g(i)} = - \frac{k_{(i)}}{\mu_g} \frac{\partial p_{(i)}}{\partial x}, \quad (2)$$

где  $k_{(i)}$  - коэффициент проницаемости газа,  $\mu_g$  - динамическая вязкость газа.

Зададим зависимость коэффициента проницаемости для газа от газонасыщенности на основе формулы Козени:

$$k_{(i)} = k_0 S_{g(i)}^3.$$

Газ будем считать калорически совершенным:

$$p_{(i)} = \rho_{g(i)} R_g T_{(i)}. \quad (3)$$

Уравнение притока тепла, пренебрегая баротермическим эффектом, запишем в виде:

$$\rho c \frac{\partial T_{(i)}}{\partial t} + \rho_{g(i)} c_g m S_{g(i)} v_{g(i)} \frac{\partial T_{(i)}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T_{(i)}}{\partial x} \right), \quad (4)$$

$$\rho c = (1-m) \rho_{sk} c_{sk} + m S_g \rho_g c_g + m S_l \rho_l c_l + m S_h \rho_h c_h,$$

$$\lambda = (1-m) \lambda_{sk} + m S_g \lambda_g + m S_l \lambda_l + m S_h \lambda_h$$

Здесь  $\rho c$  и  $\lambda$  - удельная объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности системы. Поскольку в значения  $\rho c$  и  $\lambda$  основной вклад вносят параметры скелета пористой среды, то во всем пласте будем полагать их постоянными.

Представленные уравнения необходимо дополнить условиями баланса массы и тепла на границе фазового перехода:

$$m S_{h(1)} \rho_h (1-g) \dot{x}_{(s)} = m S_{l0} \rho_l \dot{x}_{(s)},$$

$$m S_{g(2)} \rho_{g(s)}^0 (v_{g(2)} - \dot{x}_{(s)}) + m S_{h(1)} \rho_h g \dot{x}_{(s)} = m S_{g(1)} \rho_{g(s)}^0 (v_{g(1)} - \dot{x}_{(s)}), \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial T_{(1)}}{\partial x} - \lambda \frac{\partial T_{(2)}}{\partial x} = m S_{h(1)} \rho_h l \dot{x}_{(s)},$$

где  $S_{h(1)}$  - гидратонасыщенность первой области,  $S_{l0}$  - начальная водонасыщенность,  $l$  - удельная теплота гидратообразования,  $\dot{x}_{(s)}$  - скорость движения фазовой границы фазового перехода.

Давление и температура на границе между областями связаны условием фазового равновесия:

$$T_{(s)} = T_0 + T_* \ln \left( \frac{p_{(s)}}{p_{s0}} \right), \quad (6)$$

где  $T_0$  - исходная температура системы,  $p_{s0}$  - равновесное давление, соответствующее исходной температуре,  $T_*$  - эмпирический параметр, зависящий от вида газогидрата.

Будем полагать, что в начальный момент времени в пористой среде давление  $p_0$  и температура  $T_0$  во всех точках пласта одинаковы, причем  $p_0 < p_{s0}$ . Эти два условия запишем в виде:

$$p_{(2)} = p_0, \quad T_{(2)} = T_0 \quad (t = 0, x \geq 0). \quad (7)$$

На границе гидратообразования потребуем условие непрерывности давления и температуры:

$$p_{(1)} = p_{(2)} = p_{(s)}, \quad T_{(1)} = T_{(2)} = T_{(s)} \quad (x = x_{(s)}). \quad (8)$$

Условия на границе пласта запишем в виде:

$$T_{(1)} = T_e, \quad p = p_e \quad (t > 0, x = 0). \quad (9)$$

### Решение задачи

Сформулированная выше задача является автомодельной. Введем автомодельную переменную в виде:

$$\xi = \frac{x}{\sqrt{\mathfrak{N}^{(T)} t}}.$$

Применив закон Дарси (2) к уравнениям (1) и (4) и записав их через автомодельную переменную, получим два дифференциальных уравнения второго порядка, которые описывают распределения давления и температуры во всем пласте:

$$\frac{d^2 p_{(i)}}{d\xi^2} = \frac{T_{(i)}}{p_{(i)}} \left[ \frac{m S_{g(i)} \mu_g \mathfrak{N}^{(T)}}{2 k_{(i)}} \xi \frac{d}{d\xi} \left( \frac{p_{(i)}}{T_{(i)}} \right) - \frac{dp_{(i)}}{d\xi} \frac{d}{d\xi} \left( \frac{p_{(i)}}{T_{(i)}} \right) \right], \quad (10)$$

$$\frac{d^2 T_{(i)}}{d\xi^2} = -\frac{1}{2} \xi \frac{dT_{(i)}}{d\xi} - \frac{c_g k_{(i)} p_{(i)}}{\lambda \mu_g R_g T_{(i)}} \frac{dp_{(i)}}{d\xi} \frac{dT_{(i)}}{d\xi}, \quad (11)$$

где  $\frac{d}{d\xi} \left( \frac{p_{(i)}}{T_{(i)}} \right) = \frac{T_{(i)} \frac{dp_{(i)}}{d\xi} + p_{(i)} \frac{dT_{(i)}}{d\xi}}{T_{(i)}^2}.$

При этом условия (5) на фронтальной поверхности запишутся в виде:

$$\lambda \frac{dT_{(1)}}{d\xi} - \lambda \frac{dT_{(2)}}{d\xi} = \frac{m S_{h(1)} \rho_h l \mathfrak{N}^{(T)}}{2} \xi_{(s)} \quad (12)$$

Данную систему дифференциальных уравнений второго порядка решим численно методом пристрелки, которая заключается в следующем. Начиная с границы  $\xi = 0$  до предполагаемой границы фазового перехода  $\xi = \xi_{(s)}^*$ , методом Рунге-Кутты решается задача Коши при условии (9) и произвольно заданных производных давления  $p'(0)$  и температуры  $T'(0)$ . На границе фазового перехода для координаты  $\xi_{(s)}^*$ , определяемой из условия выполнения соотношения (6), на основе условий (12) вычислялись новые значения производных давления и температуры ( $p'(\xi_{(s)}^*)$  и  $T'(\xi_{(s)}^*)$ ). Данные значения, наряду со значениями  $\xi = \xi_{(s)}$ ,  $p = p_{(s)}$  и  $T = T_{(s)}$  являются начальными условиями для решения системы уравнений (10) и (12) во второй области ( $i = 2$ ). Подбор значений  $p'(0)$  и  $T'(0)$  продолжалась до тех пор, пока при их определенных значениях давление и температура на бесконечности ( $\xi = \infty$ ) не соответствовали с заданной погрешностью условию (7). Система уравнений интегрировалась при следующих значениях параметров системы гидрат-пористая среда:  $m = 0,1$ ,  $g = 0,12$ ,  $p_0 = 4$  МПа,  $T_0 = 280$  К,  $T_* = 10$  К,  $p_{s0} = 5,5$  МПа,  $k_0 = 10^{-14}$  м<sup>2</sup>,  $\rho_h = 900$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_l = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda = 2$  Вт/(м·К),  $l = 5 \cdot 10^5$  Дж/кг,  $\rho c = 2,5 \cdot 10^6$  Дж/(К·м<sup>3</sup>),  $\mu_g = 10^{-5}$  кг/(м·с),  $c_g = 1560$  Дж/(К·кг)

На рис. 1 представлено распределение температуры и давления при нагнетании метана под давлением  $p_e=5$  МПа с температурой  $T_e=278$ К (сплошная линия). Из рисунка видно, что температура пласта перед фронтом гидратообразования ниже равновесной температуры (пунктирная линия), а за фронтом - выше. Поэтому в данном случае решение с фронтальной границей фазовых переходов является непротиворечивым.

На рис. 2 показаны распределения температуры и давления при нагнетании метана под давлением  $p_e=6$  МПа с температурой  $T_e=278$ К (сплошная линия). Из рисунка видно, что температура пласта за фронтом гидратообразования опускается ниже равновесной температуры (пунктирная линия), что соответствует переохлаждению воды в этой области. Поэтому в данном случае модель с фронтальной поверхностью фазовых переходов является противоречивой. Значит, при данных значениях параметра газа, следует вводить еще и промежуточную область, где газ, газогидрат и вода находятся в состоянии термодинамического равновесия.

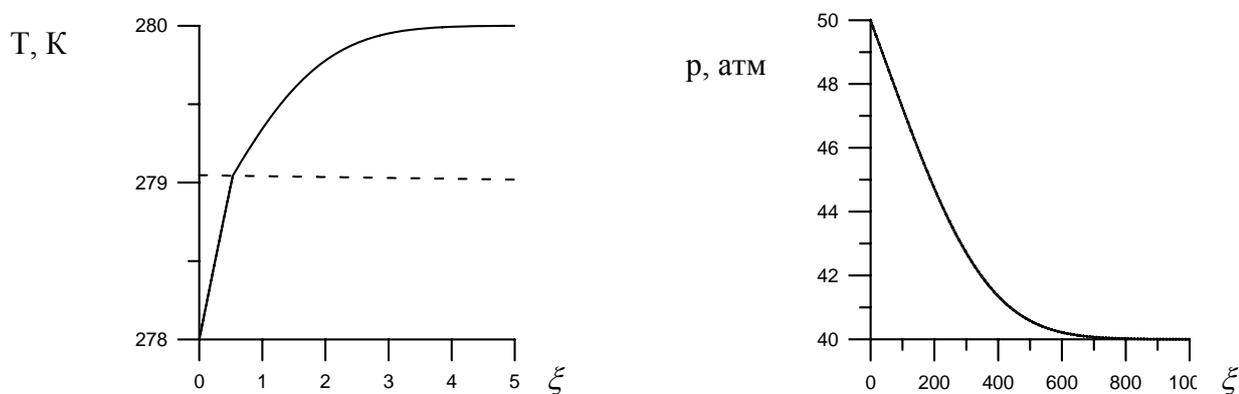


Рис. 1 Распределение температуры и давления в пласте при  $p_e=50$  атм (непротиворечивый случай).

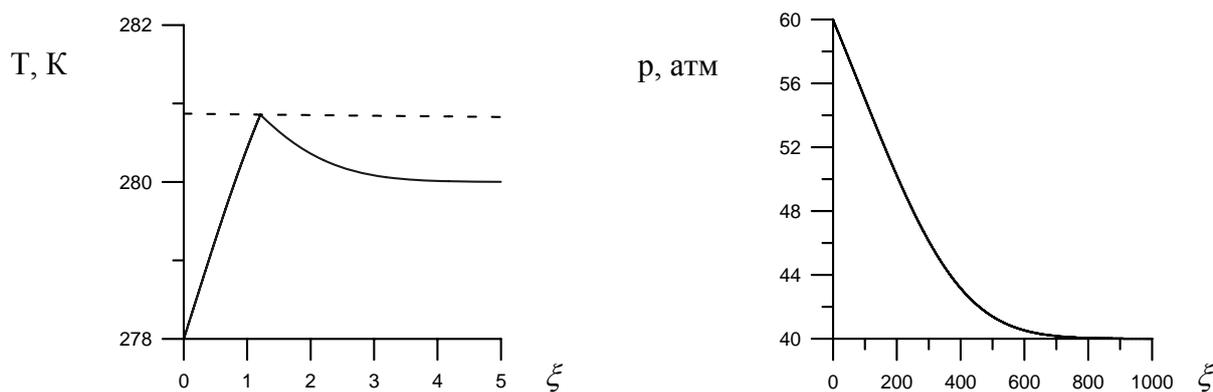


Рис. 2 Распределение температуры и давления в пласте при  $p_e=60$  атм (противоречивый случай).

### Литература

[1] Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты.- М.:Химия, 1980.-296 с.  
 [2] Jadhwar P., Mohammadi A.H., Yang J., Tohidi B. Subsurface carbon dioxide storage through clathrate hydrate formation // Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide.- Springer. Printed in the Netherlands.- 2006. pp. 111-126.

- [3] Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях.- М.:Недра, 1992.- 236 с.
- [4] Нигматуллин 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.
- [5] Васильев В.И., Попов В.В., Цыпкин Г.Г. Численное исследование разложения газовых гидратов, сосуществующих с газом в природных пластах. // Механика жидкости и газа. 2006. №4.С. 127-134.
- [6] Шагапов В.Ш., Мусакаев А.Г., Хасанов М.К. Нагнетание газа в пористый резервуар, насыщенный газом и водой. // Теплофизика и аэромеханика. 2005.Т.12, №4.-С.645-656.