

Особенности образования гидрата в пористых пластах при продувке газом

Гималтдинов И.К., Хасанов М.К., Столповский М.В., Кильдибаева С.Р.

Стерлитамакская государственная педагогическая академия им. З. Бишевой, Стерлитамак

Теоретически исследуются процессы образования газогидрата в насыщенных изначально газом и водой пористых средах конечной протяженности при продувке их холодным газом. Исследовано влияние исходных параметров пористой среды, а также условий продувки на особенности эволюции полей гидратонасыщенности и температуры. Показано, что при некоторых параметрах нагнетаемого газа возможна остановка границы фазового перехода.

1. Введение

Образование газовых гидратов в пористых структурах в настоящий момент имеет широкие промышленные перспективы, связанные, в первую очередь, с возможностью хранения газа в гидратном состоянии. В основу гидратного способа хранения газа положено то обстоятельство, что при одинаковых условиях в единице объема в гидратном состоянии содержится значительно больше газа, чем в свободном состоянии [1, 2].

2. Постановка задачи и основные уравнения

Рассмотрим задачу об образовании газогидрата в пористом пласте длины L при закачке холодного газа. В этом случае интенсивность образования гидрата лимитируется отводом скрытой теплоты гидратообразования. При теоретическом описании процессов теплопереноса при закачке газа в пласт примем следующие допущения: пористость постоянна, газ — калорически совершенный, скелет пористой среды, гидрат и вода — несжимаемы и неподвижны. Система основных уравнений, описывающая процессы фильтрации и теплопереноса, сопровождающиеся образованием газогидрата в пористой среде, и представляющая собой законы сохранения масс и энергии, закон Дарси и уравнение состояния для газа в плоскоодномерном случае при отмеченных выше допущениях имеет вид [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g m S_g + \rho_h m S_h G) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_g m S_g v_g) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} (m \rho_l S_l + m (1 - G) \rho_h S_h) &= 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho c T) + \rho_g c_g m S_g v_g \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial t} (m \rho_h S_h L_h), \\ m S_g v_g &= - \frac{k_g}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial x}, \\ p &= \rho_g R_g T, \end{aligned} \quad (1)$$

где m — пористость; G — массовая концентрация газа в гидрате; ρ_j и S_j ($j = sk, h, l, g$) — истинные плотности и насыщенности пор j -ой фазы; v_g , k_g , c_g и μ_g — соответственно скорость, проницаемость, удельная теплоемкость и динамическая вязкость газовой фазы; p — давление; T — температура; L_h — удельная теплота гидратообразования; ρc и λ — удельная объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности системы; индексы sk, h, l и g относятся к параметрам скелета, гидрата, воды и газа соответственно. Анализ показывает, что при отмеченных выше допущениях можно пренебречь переменностью удельной объемной теплоемкости ρc и коэффициентом теплопроводности системы λ . Данная система уравнений дополняется зависимостью коэффициента проницаемости для газа от газонасыщенности, заданной на основе формулы Козени:

$$k_g = k_0 S_g^3,$$

где k_0 — абсолютная проницаемость пласта.

В общем случае при образовании гидрата возникают три характерные области: ближняя, насыщенная газом и гидратом, дальняя, заполненная газом и водой, а также промежуточная область, в которой газ, гидрат и вода находятся в состоянии термодинамического равновесия. При этом возникают две фронтальные границы $x = x_{(i)}$ ($i = n, d$),

разделяющие между собой указанные области. На этих поверхностях, где терпят скачки насыщенности фаз, а также потоки массы и тепла, выполняются соотношения, следующие из условий баланса массы и тепла:

$$\begin{aligned} [m(S_h \rho_h (1 - G) + S_l \rho_l) \dot{x}_{(i)}] &= 0, \\ [m(\rho_g S_g (v_g - \dot{x}_{(i)}) - \rho_h S_h G \dot{x}_{(i)})] &= 0, \\ \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] &= [m \rho_h L_h S_h \dot{x}_{(i)}]. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $[\psi]$ — скачок параметра ψ на границе между зонами; $\dot{x}_{(s)}$ — скорость движения этой границы. Температура и давление на этих границах полагаются непрерывными. В трехфазной области, где одновременно присутствуют газ, вода и гидрат, и происходит процесс образования газогидрата, принимается условие равновесия фаз [1]:

$$T = T_0 + T_* \ln \left(\frac{p}{p_{s0}} \right), \quad (3)$$

где T_0 — исходная температура системы; p_{s0} — равновесное давление, соответствующее исходной температуре; T_* — эмпирический параметр, зависящий от вида газогидрата. Пусть пористый пласт в начальный момент времени насыщен газом и водой, давление p_0 и температура T_0 которых в исходном состоянии соответствуют термодинамическим условиям существования их в свободном состоянии и изначально одинаковы во всем пласте:

$$t = 0 : \quad S_l = S_{l0}, \quad T = T_0, \quad p = p_0 \quad (x \geq 0).$$

Через границу пласта закачивается газ (одноименный исходному), давление p_e и температура T_e которого соответствуют условиям образования газогидрата и поддерживаются на этой границе постоянными:

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

На правой границе пласта примем условие отсутствия кондуктивного потока тепла и постоянство давления (равное давлению в начальный момент времени p_0):

$$x = L : \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad p = p_0 \quad (t > 0).$$

На основе системы уравнений (1) можно получить уравнения пьезо- и теплопроводности, которые описывают распределения давления и температуры в ближней и дальней областях:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{T} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\aleph^{(P)}}{T} \frac{\partial p}{\partial x} \right), \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= \aleph^{(T)} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\rho_g k_g c_g}{\mu_g \rho c} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x}, \end{aligned} \quad (4)$$

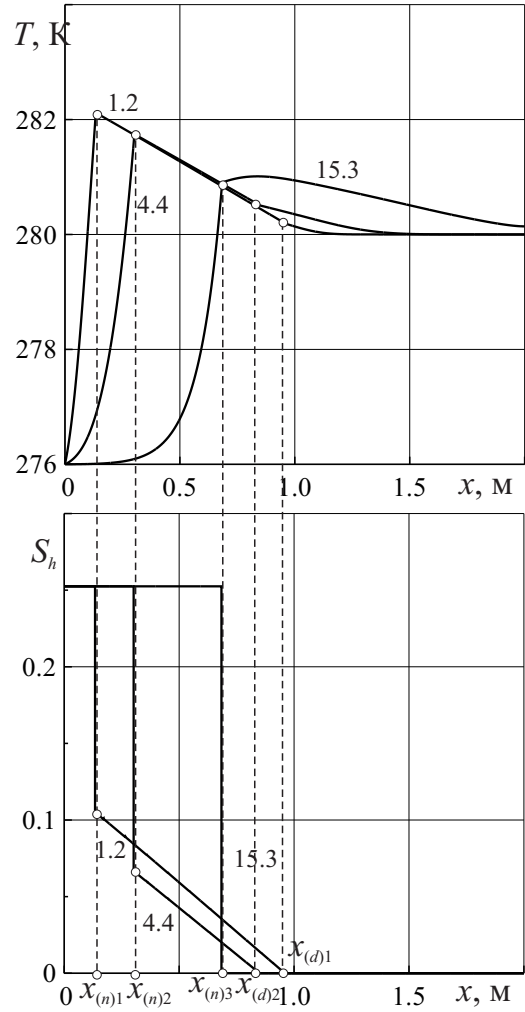


Рис. 1. Распределение температуры и гидратонасыщенности при продувке пласта. Плоскооднородная задача: $p_e = 7$ МПа. Числа на кривых — время в часах

где $\aleph^{(T)} = \lambda / \rho c$ и $\aleph^{(P)} = k_g p / \mu_g m S_g$ — коэффициенты температуропроводности и пьезопроводности.

В промежуточной области на основе системы (1) получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p S_g}{T} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_g p}{\mu_g T} \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \rho c \frac{G R_g}{L_h} \frac{\partial T}{\partial t} + \\ &\quad \frac{\rho_g c_g k_g}{\mu_g} \frac{G R_g}{L_h} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda \frac{G R_g}{L_h} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \\ \frac{\partial S_h}{\partial t} &= \frac{1}{\Delta T} \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\rho_g k_g c_g}{m \rho_h \mu_g L_h} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} - \\ &\quad - \frac{\lambda}{m \rho_h L_h} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Delta T = m \rho_h L_h / \rho c$.

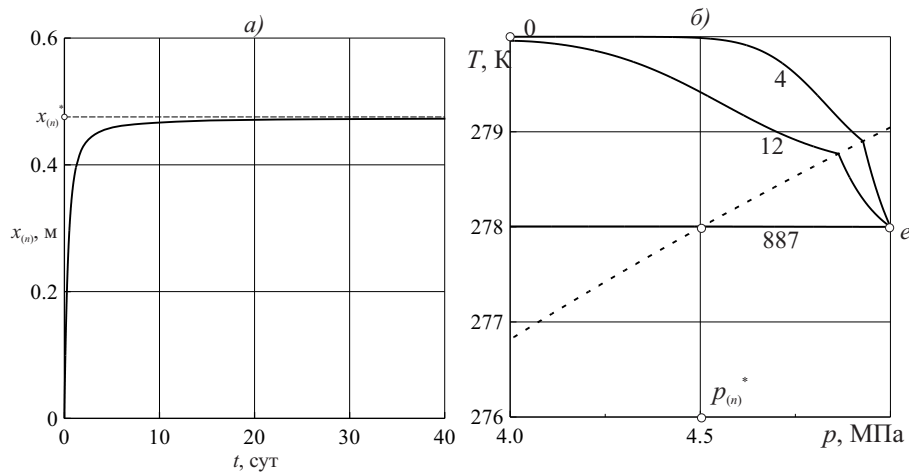


Рис. 2. а) Зависимость положения фронта гидратообразования от времени при продувке пласта газом. Плоско-симметричная задача: $p_e = 5$ МПа. б) Фазовая диаграмма процесса образования гидрата при продувке пласта газом. Числа на кривых выражают время в часах

3. Результаты расчетов

Для численного решения задачи (4), (5) с начально-граничными условиями и условиями (2) на границах фазового перехода введем равномерную сетку с шагом Δx . Так как решение ищется в областях с двумя неизвестными границами фазовых переходов, то будем использовать метод ловли фронтов в узлы пространственной сетки. Суть данного метода заключается в следующем: за один временной шаг фронт x_n перемещается по координате x ровно на один шаг, а узел, соответствующий границе x_d , находится в ходе решения задачи. При этом значения параметров на границе фазовых переходов, а также значение временного шага, определяются из системы (2). Все расчеты были проведены для системы «пористая среда-твердый газогидрат-газ», со следующими параметрами: $m = 0.1$, $G = 0.12$, $S_{l0} = 0.2$, $k_0 = 10^{-13}$, $\mu_g = 10^{-5}$ Па·с, $\lambda = 2$ Вт/(м·К), $\rho_c = 2.6 \cdot 10^6$ Дж/(кг·К), $L_h = 5 \cdot 10^5$ Дж/кг, $\rho_h = 900$ кг/м³, $\rho_l = 900$ кг/м³, $T_0 = 280$ К, $T_* = 10$ К, $p_0 = 4$ МПа, $p_{s0} = 5.5$ МПа, $c_g = 1560$ Дж/(кг·К). При этом шаг по пространственной координате полагался равным $\Delta x = 0.001$ м. Анализ полученных решений при нагнетании газа под давлениями $p_e = 5$ МПа и $p_e = 7$ МПа показал, что результаты расчетов на начальном этапе процесса образования газового гидрата в пластах конечной протяженности практически совпадают с результатами автоматической постановки задачи, т.е. в зависимости от параметров нагнетания газа и пористой среды газогидрат может образовываться как на фронтальной поверхности, так и в протяженной области.

На рис. 1 для плоскоодномерного случая пред-

ставлены распределения температуры и гидратонасыщенности при продувке пласта длины $L = 2$ м газом под давлением $p_e = 7$ МПа, температурой $T_e = 276$ К. При таких параметрах нагнетаемого газа образование газогидрата в начальный момент времени происходит в протяженной области. Из рисунка следует, что с течением времени дальняя граница $x = x_{(d)}$ движется назад, навстречу ближней границе $x = x_{(n)}$. Действительно, в момент времени $t = 1.2$ ч координата дальней подвижной границы была равна $x_{(d)1} = 1$ м, а в момент времени $t = 4.4$ ч — $x_{(d)2} = 0.8$ м. При этом наблюдается падение значения гидратонасыщенности в этой области. Таким образом, в зоне трехфазного равновесия происходит частичное разложение ранее образовавшегося гидрата. Это обусловлено конвективным сносом нагретого газа за счет образования газогидрата на границе $x = x_{(n)}$ и его течения в объемной области. В момент времени $t = 15.3$ ч процесс гидратообразования происходит уже на фронтальной поверхности $x = x_{(n)}$, что соответствует изменению на этой поверхности величины гидратонасыщенности от $S_{h(n)}^- = S_{he}$ до $S_{h(n)}^+ = 0$.

На рис. 2(а) представлена зависимость положения фронта образования газогидрата от времени при нагнетании газа в пласт длиной $L = 1$ м с температурой $T = 278$ К. Для параметров, характеризующих исходное состояние системы приняты следующие значения: $p_0 = 4$ МПа, $T_0 = 280$ К, абсолютная проницаемость пласта $k_0 = 10^{-14}$. Как следует из рисунка, в случае продувки пласта при данных параметрах пласта и нагнетаемого газа, поверхность фазового перехода движется только до некоторого положения $x_{(n)}^*$, затем ее движение пре-

кращается. Это соответствует остановке границы фазового перехода и означает, что часть порового пространства будет оставаться не занятой гидратом.

Для объяснения такого поведения движения поверхности $x = x_{(n)}$ рассмотрим представленные на рис. 2(b) фазовую диаграмму и распределение давления в пласте. Здесь сплошная кривая glh определяет условие фазового равновесия между газом, водой и газогидратом. Точкой «0» изображено состояние, соответствующее начальному состоянию пористой среды, точкой «e» — условие на левой границе пористой среды $x = 0$. Как видно из рисунка, с течением времени температура пласта становится равной температуре нагнетаемого газа. Давление и однозначно связанная с ним равновесная температура имеют вид прямой, убывающей вглубь пласта. Поэтому, имеется такая точка $x = x_{(n)}^*$, в ко-

торой равновесная температура совпадает с температурой пласта. Таким образом, для образования газогидрата в пласте в случае продувки его газом необходимо, чтобы температура нагнетаемого газа удовлетворяла следующему условию:

$$T_e < T_0 + T_* \ln \left(\frac{p_e}{p_{s0}} \right) \quad (t > 0, \quad x = 0).$$

Список литературы

- [1] Бык С.,Ш. Газовые гидраты. М: Химия, 1980.
- [2] Истомин В.А. Газовые гидраты в природных условиях. М: Недра, 1992.
- [3] Шагапов В.Ш. Численное исследование процессов образования газогидрата в пористой среде конечной протяженности при продувке газом // ПМТФ. 2011. Т.52, № 4. С. 116–126.