

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ***Усманова Инна Рамилевна***

студентка

Халиков Ильмир Зинфирович

студент

Столповский Максим Владимирович

канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель

Филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный
авиационный технический университет» в г. Стерлитамаке
г. Стерлитамак, Республика Башкортостан

**ПРОДУВКА ПЛАСТА ГАЗОМ, СОПРОВОЖДАЮЩАЯСЯ
ОБРАЗОВАНИЕМ ГАЗОГИДРАТА**

Аннотация: статья посвящена проблеме продувки пласта газом с образованием газогидрата. В работе рассмотрен процесс образования газогидрата в частично насыщенном водой пористой среде конечной протяженности при продувке газом, а также исследовано влияние начальных параметров и параметров нагнетаемого газа на эволюции полей гидратонасыщенности и температуры.

Ключевые слова: продувка пласта газом, газогидрат, газ, давление, температура, пористый пласт, пористая среда, эксперимент.

Рассмотрен процесс образования газогидрата в частично насыщенном водой пористой среде конечной протяженности при продувке газом. Исследовано влияние начальных параметров и параметров нагнетаемого газа на эволюции полей гидратонасыщенности и температуры.

Рассмотрим пористый пласт длины L изначально насыщенный газом и водой, давление p_0 и температура T_0 которых соответствует условиям их стабильного существования. В момент времени $t = 0$ через левую границу пласта начинается закачка газа, одноименного исходному, под давлением p_e и температурой

T_e . В результате нагнетания газа в пласте образуются три области. Ближняя область, примыкающая к левой границе пласта, содержит газ и газогидрат, а дальняя, примыкающая к правой границе пласта – газ и воду. Промежуточная область (гидратная волна), которая разделяет между собой две вышеуказанные области, содержит газ, гидрат и воду в состоянии термодинамического равновесия.

Система основных уравнений, представляющая собой законы сохранения масс, энергии и закон Дарси, при допущениях о несжимаемости и неподвижности скелета пористой среды, гидрата и воды, а также пренебрежении баротермическим эффектом имеет вид [1; 2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_g m S_g + \rho_h m S_h G) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_g m S_g v_g) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial t}(m \rho_l S_l + m(1-G)\rho_h S_h) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) + \rho_g c_g m S_g v_g \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial t}(m \rho_h S_h L_h), \quad (1) \\ m S_g v_g = -\frac{k_g}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad p = \rho_g R_g T, \end{aligned}$$

где m – пористость; G – массовая концентрация газа в гидрате; p_j и S_j ($j = sk, h, l, g$) – истинные плотности и насыщенности пор j -ой фазы; v_g, k_g, c_g и – соответственно скорость, проницаемость, удельная теплоемкость и динамическая вязкость газовой фазы; p – давление; T – температура; L_h – удельная теплота гидратообразования; i – 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 коэффициента теплопроводности системы λ . При образовании газогидрата в пласте возникают зоны, в которых газ, гидрат и вода находятся в различных состояниях. На границах между этими зонами выполняются следующие соотношения:

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

Здесь $[\psi]$ – скачок величины ψ на границе $x_{(i)}$ между областями, $\dot{x}_{(i)}$ – скорость движения границы фазового перехода; индексы $i = n$ и d соответствуют ближней и дальней границам. Температуру и давление на них будем полагать непрерывными.

Температура и давление в области совместного существования газа, гидрата, воды связаны условием фазового равновесия [2; 3]:

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

где T_0 – исходная температура системы, p_{s0} – равновесное давление, соответствующее исходной температуре, T_* – эмпирический параметр, зависящий от вида газогидрата. На правой границе пласта ($x = L$) поставим условия, моделирующие отсутствие кондуктивного потока тепла и постоянное, равное p_0 , давление:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad p = p_0 \quad (t > 0, x = L), \quad (4)$$

Так как решение ищется в областях с двумя неизвестными границами фазовых переходов, то будем использовать метод ловли фронтов в узлы пространственной сетки [2; 3]. Все расчеты были проведены для системы «пористая среда – твердый газогидрат – газ», со следующими параметрами: $m = 0.1$, $G = 0.12$, $S_{l0} = 0.2$, $k_0 = 10^{-13} \text{ м}^2$, $\mu_g = 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\lambda = 2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $\rho c = 2.6 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, $L_h = 5 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}$, $\rho_h = 900 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\rho_l = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$, $T_0 = 280 \text{ К}$, $T_* = 10 \text{ К}$, $p_0 = 4 \text{ МПа}$, $p_{s0} = 5.5 \text{ МПа}$, $c_g = 1560 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$. При этом длина модельного пласта полагалась равной $L = 1 \text{ м}$, шаг по пространственной координате $\Delta x = 0.001 \text{ м}$. Анализ полученных решений при нагнетании газа под давлениями $p_e = 5 \text{ МПа}$ и $p_e = 7 \text{ МПа}$ показал, что результаты расчетов на начальном этапе процесса образования газового гидрата в пластах конечной протяженности практически совпадают с результатами автомодельной 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 плоскосимметричного случая представлены распределения температуры и гидратонасыщенности при продувке пласта газом с температурой $T_e = 276\text{ K}$. Начальные параметры системы полагались равными $p_0 = 4\text{ МПа}$, $T_0 = 280\text{ K}$, $k_0 = 10^{-13}\text{ м}^2$. В этом случае в начальный момент времени образование газогидрата происходит в протяженной области. Из рисунка следует, что с течением времени дальняя граница $x = x_{(d)}$ движется назад, навстречу ближней границе $x = x_{(n)}$, т.е. в объемной области происходит частичное разложение ранее образовавшегося гидрата. Это обусловлено конвективным сносом нагретого газа, за счет образования газогидрата в более верхних слоях и его течения в объемной области. Такое перемещение назад переднего фронта гидратной волны способствует тому, что большая часть гидрата начинает образовываться на поверхности $x = x_{(n)}$, что приводит к уменьшению значения гидратонасыщенности со стороны протяженной области. К моменту времени $t = 25\text{ мин.}$ (при данных параметрах нагнетаемого газа) происходит слияние границ фазовых переходов, в результате чего процесс гидратообразования происходит только на фронтальной поверхности $x = x_{(n)}$, что соответствует изменению на этой поверхности величины гидратонасыщенности от $S_{h(n)}^- = S_{he}^-$ до $S_{h(n)}^- = 0$.

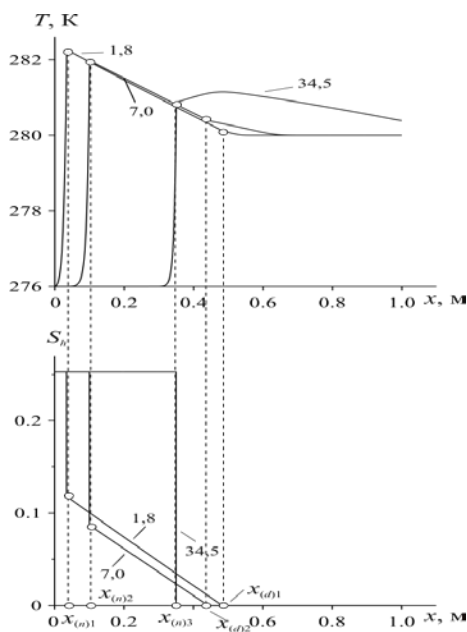


Рис. 1. Распределение температуры и гидратонасыщенности при продувке пласта. Плоскосимметричная задача: $p_e = 7\text{ МПа}$.

Числа на кривых выражают время в минутах

Численные эксперименты показали, что при определенных параметрах нагнетаемого газа и исходных параметрах пористой среды, возможна остановка границы гидратообразования. Показано, что если температура нагнетаемого газа удовлетворяет условию

$$T_e = T_0 + T_* \ln(p_0/p_{s0}),$$

граница гидратообразования движется без остановки.

Список литературы

1. Гималтдинов И.К., Столповский М.В., Хасанов М.К. Особенности образования газогидратов при нагнетании холодного газа в пористую среду, насыщенную газом и водой / И.К. Гималтдинов, М.В. Столповский, М.К. Хасанов // Теоретические основы химических технологий. – 2010. Т. 44. – №4. – С. 442–449.
2. Шагапов В.Ш. Численное моделирование образования газогидрата в пористой среде конечной протяженности при продувке газом / В.Ш. Шагапов [и др.] // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т. 52. – №4. – С. 116–126.
3. Гималтдинов И.К. Особенности разложения газовых гидратов при тепловом и депрессионном воздействиях в пластах конечной протяженности / И.К. Гималтдинов [и др.] // Вестник Тюменского государственного университета. – 2011. – №7. – С. 6–13.