ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Халиков Ильмир Зинфирович
студент
Усманова Инна Рамилевна
студентка
Столповский Максим Владимирович
канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель

Стерлитамакский филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»
г. Стерлитамак, Республика Башкортостан

ПРОДУВКА ПЛАСТА ГАЗОМ, СОПРОВОЖДАЕМАЯ ОБРАЗОВАНИЕМ ГАЗОВОГО ГИДРАТА

Аннотация*: в статье теоретически изучен процесс образования газогидрата частично насыщенной водой в пористой среде конечной протяженности при продувке холодным газом. Показано, что образование гидрата может происходить как на фронтальной поверхности, так и в протяженной области.*

Ключевые слова*: газогидрат, горизонтальный пористый пласт, пористая среда, газ, вода, гидрат, гидратонасыщенность, температура пласта, гидратообразование.*

Задачи, связанные с образованием и разложением газогидратов в настоящее время представляют значительный научный и практический интерес, что обусловлено перспективой использования их в различных технологиях. В частности, рядом исследователей предлагается подземная газогидратная консервация парниковых газов, которая обеспечивает высокий уровень безопасности хранения и имеет небольшие энергетические затраты [1–3].

Данная работа является продолжением [4]. Здесь рассматривается образование газогидрата в насыщенном жидкостью пористом пласте конечной протяженности при инжекции газа. В вышеуказанной работе пласт полагался полубесконечным, задача решалась в автомодельной постановке.

Рассмотрим горизонтальный пористый пласт длины L, насыщенный в начальный момент времени газом (метаном) и водой. Давление p_0 и температура T_0 соответствуют условиям существования их в свободном состоянии, т.е. $p_0 < p_{s0}$, где $p_{s0} = p_s(T_0)$ – равновесное давление гидратообразования, соответствующее исходной температуре T_0. Пусть в момент времени t=0 через левую границу пористого пласта (x=0) начинает закачиваться газа (одноименного исходному) под давлением p_e и температурой T_e. Величины p_e и T_e соответствуют условиям стабильного существования гидрата (p_e>p_s(T_e)). Будем полагать, что в результате инжекции газа в пласте образуется две области, разделенные между собой подвижной границей $x = x_{(n)}$. В ближней ($0 \leq x < x_{(n)}$) вода полностью перешла в гидратное состояние, поэтому в порах присутствуют только газ и гидрат. Поры дальней области ($x_{(n)} < x \leq L$) заполнены газом и водой. Таким образом, согласно принятой модели, будем считать, что образование газогидрата происходит только на фронтальной поверхности.

Для описания процессов тепло – и массопереноса при инжекции газа, сопровождающихся образованием газовых гидратов, примем следующие допущения: пористость постоянна, скелет пористой среды, вода, газогидрат несжимаемы и неподвижны, газ калорически совершенный:

$$m, \rho_{sk}, \rho_i, \rho_h = const, \upsilon_{sk} = \upsilon_i = \upsilon_h = 0, p = \rho_g R_g T \quad (1)$$

Здесь m – пористость, ρ_jи υ_j, соответственно, истинная плотность и скорость j-ой (sk, l, h) фазы, p – давление, T – температура, R_g – газовая постоянная, индексы sk, l, g, h относятся к параметрам скелета пористой среды, воды, газа и гидрата соответственно. Кроме того, будем полагать, что процесс однотемпературный, т.е. температура пористой среды и насыщающего ее вещества (газа,

воды и гидрата) в каждой точке совпадают. Гидрат является двухкомпонентной системой с массовой концентрацией газа G.

С учетом допущений уравнения сохранения массы (газа и воды) и притока тепла (без учета баротермического эффекта), закон Дарси в плоскоодномерном случае имеют вид [4, 5]:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(mS_g\rho_g\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(mS_g\upsilon_g\rho_g\right)=-mG\rho_h\frac{\partial S_h}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(mS_i\rho_i\right)=-m(1-G)\rho_h\frac{\partial S_h}{\partial t}, \quad (3)$$

$$pc\frac{\partial T}{\partial t}p_g c_g mS_g\upsilon_g\frac{\partial T}{\partial x}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+m\rho_h L_h\frac{\partial S_h}{\partial t}, \quad (4)$$

$$mS_g\upsilon_g=\frac{k_g}{\mu_g}\frac{\partial p}{\partial x}, \quad (5)$$

$$S_g+S_h+S_l=1 \quad (6)$$

где Sj (j = g, h, l) – насыщенности пор j-й фазой, υ_g , kg и μ_g – соответственно скорость, проницаемость и динамическая вязкость газовой фазы, pc и λ – удельная объемная теплоемкость и теплопроводность системы, Lh – удельная теплота разложения газогидрата. Так как основной вклад в величины pc и λ вносят параметры скелета пористой среды, то будем полагать их постоянными. Зависимость коэффициента проницаемости для газа от газонасыщенности, зададим на основе формулы Козени:

$$k_g=k_0S_g^3, \quad (7)$$

где k_0 – абсолютная проницаемость пласта.

На границе $x = x_{(n)}$, разделяющей ближнюю и дальнюю области, должны выполняться соотношения, следующие из баланса массы и тепла:

$$\left[m(S_n\rho_n(1-G)+S_i\rho_i)\,\dot{x}_{(n)}=0\right]\ \left[m\left(\rho_gS_g\left(\upsilon_g-\dot{x}_{(n)}\right)\rho_nS_nG\,\dot{x}_{(n)}\right)\right]=0,$$

$$\left[\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right]=\left[m\rho_nL_nS_n\,\dot{x}_{(n)}\right] \quad (8)$$

Здесь $[f]$ – скачок величины f на границе x = x(n) между областями, $\dot{x}_{(n)}$ - скорость движения этой границы. Температура и давление на данной границе связаны условием фазового равновесия [4]:

$$T_{(s)} = T_0 T_* \ln\left(\frac{p_{(S)}}{p_{s0}}\right), \quad (9)$$

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:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, p = p_0 \ \ (t = 0, \ \ X = L) \quad (10)$$

В качестве начальных условий системы примем следующие параметры:

$$T = T_0\,, p = p_0,\ S_i = S_{i0}, S_n = 0, S_g = 1 - S_{i0} (t = 0, 0 \le x \le L) \quad (11)$$

Применив закон Дарси (5) к системе (2)–(4) получим уравнения пьезо- и теплопроводности, описывающие распределения давления и температуры в обеих областях:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{p}{T}\right) = \frac{\partial}{\partial_x}\left(\frac{\aleph^{(p)}}{T}\frac{\partial p}{\partial x}\right), \frac{\partial T}{\partial t} = \aleph^{(P)}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\rho_g k_g c_g}{\mu_g \rho c}\frac{\partial p}{\partial x}\frac{\partial T}{\partial x}, \quad (12)$$

где $\aleph^{(T)} = \lambda/\rho c$, $\aleph^{(F)} = k_g p/\mu_g m S_g$ – коэффициенты температуропроводности и пьезопроводности. На поверхности, разделяющей ближнюю и дальнюю области, происходит скачок гидратонасыщенности от $S_h^- = S_{h(1)}$ до $S_h^+ = 0$, причем гидратонасыщенность первой области определяется из соотношения:

$$S_{n(1)} = \frac{\rho_j S_{i0}}{\rho_n (1-G)} \quad (13)$$

Для решения системы (12) с начальными и граничными условиями (8)–(11) введем равномерную сетку с шагом h. Так как решение находится в областях с неизвестной границей фазовых переходов (x=$x_{(s)}$), то использовался метод ловли фронта в узел сетки [5], причем из системы (12) находятся поля давления и температуры в обеих областях. Давление и температура на границе x=$x_{(n)}$, а также значение временного шага находятся из (8). Все расчеты были проведены для системы «пористая среда – твердый газогидрат – газ», со следующими параметрами фаз: m=0.1, G=0.12, S_{l0}=0.2, k_0=10^{-13} м^2, μ_g=10^{-5} Па·с, λ =2 Вт/(м·К), , ρc = 2,5·10^6Дж/(K·м^3) L_h=5·10^5 Дж/кг, ρ_h=900 кг/м^3, ρ_i=1000 кг/м^3, T_0=280 К, T_*=10

К, p_0 = 3 МПа p_{s0} = 5.5 МПа, c_g = 1560 Дж/(кг·К). При этом длина пласта полагалась равной L=1 м, число точек разбиения n = 1000.

На рис. 1 представлены распределения температуры пласта и равновесной температуры при нагнетании газа в пласт с температурой T_e=277 К под давлением p_e = 5 МПа (*а*) и 6 МПа (*б*) в момент времени t=1 мин. Как видно из рисунка, при нагнетании газа под давлением p_e=5 МПа температура пласта (сплошная линия) перед фронтом гидратообразования выше, а за фронтом ниже равновесной температуры. Поэтому в данном случае фронтальная модель образования гидрата является физически непротиворечивой. При нагнетании газа под давлением p_e = 6 МПа температура пласта перед фронтом гидратообразования становится ниже равновесной температуры, что свидетельствует о переохлаждении воды во второй области. Поэтому в данном случае фронтальная модель образования гидрата дает физически противоречивое решение. Следовательно, необходимо вводить промежуточную область гидратообразования, где в состоянии термодинамического равновесия находятся газ, гидрат и вода. Кроме того, решение задачи об образовании газогидрата в пласте конечной протяженности, в начальный момент времени совпадает с автомодельным [4].

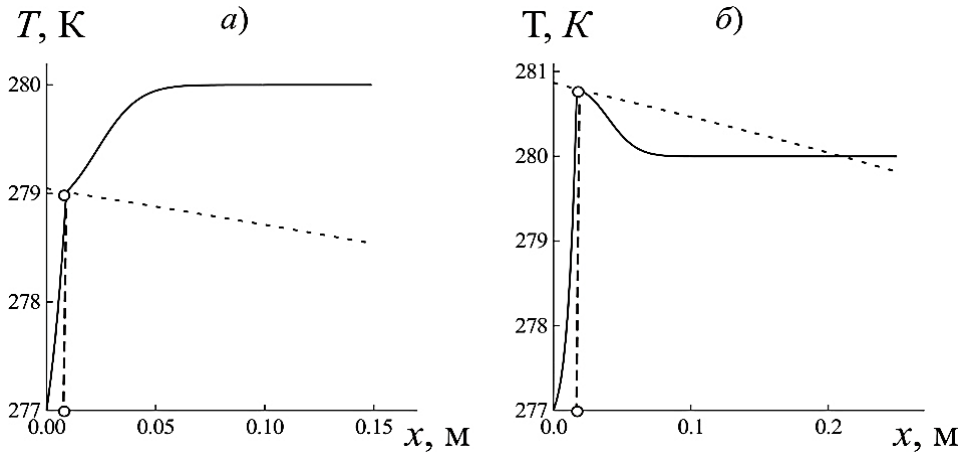

Рис. 1. Распределения температуры пласта в момент t = 1 мин.:

а – непротиворечивый случай: p_e = 5 МПа, T_e = 277 К;

б – случай «переохлаждения» воды за фронтом: p_e = 6 МПа, T_e = 277 К

(сплошная линия соответствует распределению температуры, найденной численно, штриховые линии соответствуют равновесным температурам)

В результате проведения вычислительных экспериментов в широком диапазоне параметров было установлено, что для величины давления, под которым нагнетается газ, существует некоторое максимальное значение, зависящее от проницаемости, исходной температуры и начального давления, при превышении которого невозможно в рамках фронтальной модели построить непротиворечивое решение. Для значений проницаемости, характерных для реальных пластов $k = 10^{-12} - 10^{-15}$м, величина этого предельного давления с высокой степенью точности совпадает с величиной равновесного давления ps0, соответствующего исходной температуре.

На рис. 2 представлена зависимость положения границы фазового перехода ($x = x_{(n)}$) от времени и распределения температур при продувке газом. Как видно из рисунка движение данной границы происходит только до момента времени t≈100 ч., затем происходит ее «остановка». Действительно, как следует из фрагмента (*б*) с течением времени температура пласта становится равной температуре нагнетаемого газа. Однако профиль давления, а, следовательно, и профиль равновесной температуры пласта имеют вид линейной зависимости, убывающей вглубь пласта. Поэтому при дальнейшей продувке в области ($x>x_{(n)}^*$) температура пласта становится выше равновесной температуры, т.е. в этой области в порах могут присутствовать только газ и вода в свободном состоянии. Таким образом, на границе $x = x_{(n)}^*$ процесс образования гидрата заканчивается. Очевидно, чтобы процесс гидратообразования не «останавливался» необходимо, чтобы температура нагнетаемого газа должна быть меньше, чем равновесная температура соответствующая начальному давлению на правой границе $x = L$.

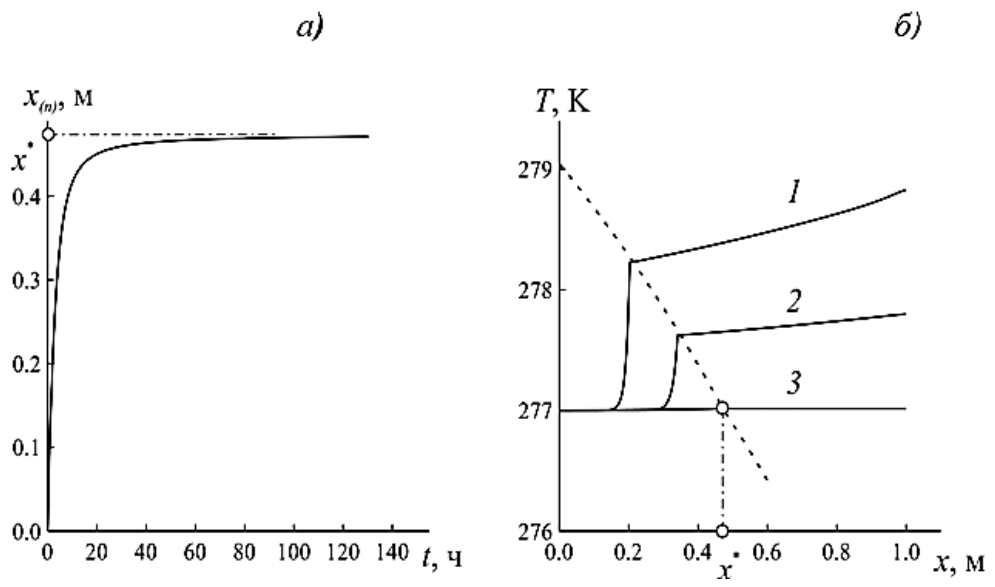

Рис. 2. Рис.2. Зависимость координаты границы фазового перехода от времени (а) и распределение температуры (б) при p_e = 5 МПа и T_e = 277 К. Линии 1–3 соответствуют моментам времени t = 1ч., 4 ч., 130 ч., штриховой линией отмечена равновесная температура, соответствующая распределению давления (фрагмент б), штрихпунктирной линией обозначена координата, при которой происходит «остановка» движения границы $x = x_{(n)}$ (фрагмент а).

Список литературы

1. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. – М.:Недра, 1992. – 236 с.

2. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. – М.: Химия, 1980. – 296 с.

3. Jadhawar 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. – P. 111-126.

4. 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.

5. Шагапов В.Ш., Хасанов М.К., Гималтдинов И.К., Столповский М.В. Численное моделирование образования газогидрата в пористой среде конечной протяженности при продувке газом // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. Т. 52, №4. – С.116 – 126.