

УДК 532.546; 536.421

ИНЖЕКЦИЯ ГАЗА В ПОРИСТУЮ СРЕДУ, СОПРОВОЖДАЮЩАЯСЯ ОБРАЗОВАНИЕМ ГАЗОГИДРАТА

© 2008 М.К. Хасанов¹

Рассматриваются особенности образования газовых гидратов при инъекции газа в пористую среду, в исходном состоянии заполненную газом и водой. Показано, что образование газогидрата может происходить как на фронтальной поверхности, так и в протяженной области. Установлены условия, при которых реализуется каждый из режимов образования гидрата.

Ключевые слова: пористая среда, образование газогидрата.

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 [1]. Рядом исследователей предлагается подземная газогидратная консервация парниковых газов, которая обеспечивает высокий уровень безопасности хранения и не требует больших энергетических затрат [2]. В основе 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 [3].

Вопросам математического моделирования процессов разложения газовых гидратов при тепловом и депрессионном воздействии на пористую среду, насыщенную газовым гидратом и газом, посвящена работа [4]. В работе [5] исследованы некоторые закономерности процесса образования газогидрата в пористой среде при закачке газа в пористую среду, насыщенную газом и водой. В настоящей работе проанализированы условия существования двух качественно различных режимов образования гидрата в пористой среде при инъекции газа.

¹Хасанов Марат Камилович (hasanovmk@mail.ru), кафедра прикладной математики и механики Стерлитамакской государственной педагогической академии, 453103, Россия, Башкортостан, г. Стерлитамак, пр. Ленина, 37.

1. Основные уравнения

При теоретическом описании процессов тепломассопереноса при закачке газа в пласт примем следующие допущения: пористость постоянна, газ — калорически совершенный, скелет пористой среды, гидрат и вода — несжимаемы и неподвижны. Допущение о неподвижности жидкости обосновано тем, что, как показывают оценки, скорость фильтрации газа, как правило, всегда много больше скорости фильтрации воды (за исключением случаев, когда водонасыщенность близка к единице). Поэтому в большинстве случаев, когда, например, насыщенность пор водой не более половины (в работе рассматривается именно этот случай), допущение о неподвижности жидкости оправдано. Система основных уравнений, описывающая процессы фильтрации и теплотеноса, 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:

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

Здесь G — массовое содержание газа в гидрате; m — пористость; p — давление, T — температура; ρ_j и S_j — истинная плотность и насыщенность пор j -й фазы ($j = h, l, g$); индексы g, l, h относятся к параметрам газа, воды и гидрата соответственно; v_g , k_g и μ_g — скорость, проницаемость и динамическая вязкость для газовой фазы; L_h — удельная теплота гидратообразования; ρc и λ — удельная объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности системы. Анализ показывает, что для случая, когда исходная водонасыщенность пор менее половины, можно пренебречь переменностью удельной объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности системы.

Зависимость коэффициента проницаемости для газа k_g от газонасыщенности можно задать на основе формулы Козени:

$$k_g = \frac{k_0 S_g^3}{(1 - m S_g)^2},$$

где k_0 — абсолютная проницаемость пласта.

Значения температуры и давления в области образования гидрата связаны с условием фазового равновесия [1]:

$$T_s = T_0 + T_* \ln \frac{p_s}{p_{s0}},$$

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

При образовании газогидрата в общем случае могут возникнуть три характерные области. В первой области, находящейся вблизи скважины поры заполнены газом и гидратом. Во второй (промежуточной) области происходит образование газогидрата, поэтому здесь поры заполнены газом, водой и гидратом. В третьей (дальней) области присутствуют газ и вода. На границах этих областей должны выполняться условия баланса массы и тепла:

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

Здесь $[\psi]$ — скачок параметра ψ на границе $x_{(s)}$ между областями; $\dot{x}_{(s)}$ — скорость движения этой границы. Температуру и давление на этих границах будем полагать непрерывными.

Будем полагать, что 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 ($p_0 \leq p_{s0}$) и изначально одинаковы во всем пласте. Эти условия могут быть записаны следующим образом:

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

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

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

2. Результаты расчетов

Исследуем существование решений с фронтальной поверхностью образования гидратов. В данном случае возникают две характерные области. В первой области, находящейся вблизи скважины, вода полностью перешла в газогидратное состояние, поэтому в порах присутствуют только газ и газогидрат. Во второй (дальней) области поры пласта заполнены газом

и водой. Таким образом, в данном случае образование газогидрата полностью происходит на фронтальной поверхности между этими областями, а промежуточная область отсутствует.

Сформулированная задача имеет автомодельное решение. Введем автомодельную переменную:

$$\xi = \frac{x}{\sqrt{\kappa(T)t}},$$

где $\kappa(T)$ — коэффициент температуропроводности пласта. Тогда решение задачи может быть записано в виде:

$$p_{(1)}^2 = p_{(s)}^2 + \frac{(p_e^2 - p_{(s)}^2) \int_{\xi}^{\xi_{(s)}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(1)}}\right) d\xi}{\int_0^{\xi_{(s)}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(1)}}\right) d\xi}, \quad 0 < \xi < \xi_{(s)},$$

$$T_{(1)} = T_{(s)} + \frac{(T_e - T_{(s)}) \int_{\xi}^{\xi_{(s)}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\text{Pe}_{(1)}}{2p_0^2} p_{(1)}^2\right) d\xi}{\int_0^{\xi_{(s)}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\text{Pe}_{(1)}}{2p_0^2} p_{(1)}^2\right) d\xi}, \quad 0 < \xi < \xi_{(s)},$$

$$p_{(2)}^2 = p_0^2 + \frac{(p_{(s)}^2 - p_0^2) \int_{\xi}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}}\right) d\xi}{\int_{\xi_{(s)}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}}\right) d\xi}, \quad \xi_{(s)} < \xi < \infty,$$

$$T_{(2)} = T_0 + \frac{(T_{(s)} - T_0) \int_{\xi}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\text{Pe}_{(2)}}{2p_0^2} p_{(2)}^2\right) d\xi}{\int_{\xi_{(s)}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - \frac{\text{Pe}_{(2)}}{2p_0^2} p_{(2)}^2\right) d\xi}, \quad \xi_{(s)} < \xi < \infty,$$

где $\eta_{(i)} = \frac{\kappa_{(i)}^{(p)}}{\kappa(T)}$, $\kappa_{(i)}^{(p)} = \frac{k_{(i)} p_0}{m S_{g(i)} \mu_g}$, $\text{Pe}_{(i)} = \frac{\rho_g c_g k_{(i)} p_0}{\lambda \mu_g}$, $k_{(i)} = k_0 S_{g(i)}^3$.

Автомодельная координата границы образования гидрата и значения параметров на ней находятся численно из системы трансцендентных уравнений, которая получается после подстановки записанных решений в условия баланса массы и тепла на границе фазовых переходов.

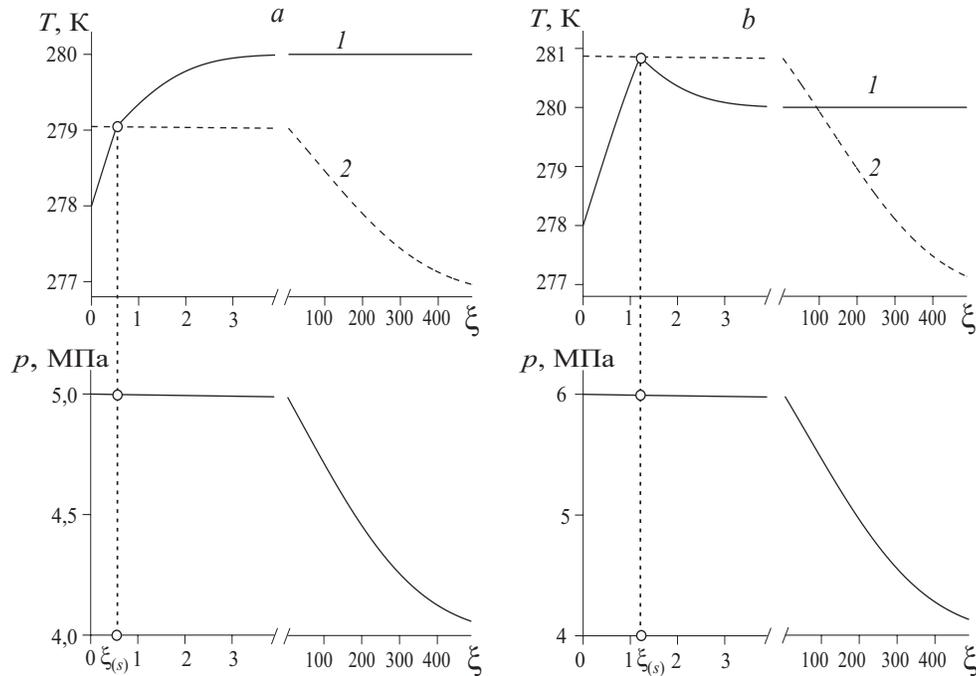


Рис. 1. Распределение температуры пласта (1), равновесной температуры (2) и давления. *a* — непротиворечивый случай, *b* — случай переохлаждения за фронтом.

Полученные решения исследованы на условие термодинамической непротиворечивости, которое состоит в том, что локальная температура в первой (ближней) области должна быть ниже локальной температуры образования гидрата, вычисляемой по найденному в процессе решения распределению давления. Соответственно, температура во второй (дальней) области должна быть выше данной равновесной температуры.

На рис. 1, *a* представлены распределения температуры и давления при нагнетании метана под давлением $p_e = 5$ МПа и с температурой $T_e = 278$ К в пласт с начальным давлением $p_0 = 4$ МПа и исходной водонасыщенностью $S_{j0} = 0,2$. Для остальных параметров, характеризующих систему, приняты следующие значения: $m = 0,1$, $G = 0,12$, $T_0 = 280$ К, $T_* = 10$ К, $p_{s0} = 5,5$ МПа, $k_0 = 10^{-14}$ м², $L_h = 5 \cdot 10^5$ Дж/кг, $c_g = 1560$ Дж/(К·кг). Пунктирная линия 2 показывает равновесную температуру, соответствующую полученному распределению давления. Из данного рисунка видно, что температура пласта перед фронтом гидратообразования ниже равновесной температуры, а за фронтом — выше этой температуры, что является физически непротиворечивым. Следовательно, в этом случае можно говорить о существовании решения с фронтальной поверхностью образования гидрата.

На рис. 1, *b* приведены распределения температуры и давления при нагнетании газа под давлением $p_e = 6$ МПа и с температурой $T_e = 278$ К. Видно, что температура пласта за фронтом гидратообразования опускается ниже равновесной температуры (пунктирная линия 2), т.е. в этой области наблюдается переохлаждение воды. Таким образом, при данном давлении

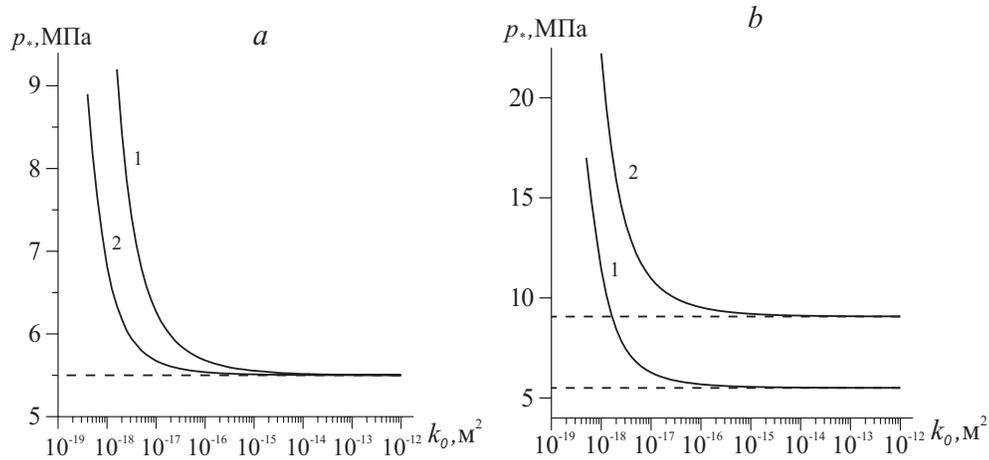


Рис. 2. Зависимость критического значения давления нагнетания газа от абсолютной проницаемости пласта при разных значениях: *a* — начального давления в пласте $p_0 = 3$ МПа (1), $p_0 = 5$ МПа (2); *b* — начальной температуры пласта $T_0 = 280$ К (1), $T_0 = 285$ К (2).

нагнетания газа модель с фронтальной поверхностью образования гидрата не позволяет построить физически непротиворечивое решение. Для устранения этого противоречия необходимо вводить протяженную область гидратообразования.

Для определения критического значения давления нагнетания газа p_* , при превышении которого фронтальная поверхность переходит в объемную область образования гидрата, были проведены численные эксперименты в широком диапазоне параметров. В результате было установлено, что основными параметрами, которые влияют на величину данного критического давления, являются проницаемость пласта, а также исходные пластовые давление и температура. На рис. 2 приведены зависимости величины критического давления от абсолютной проницаемости пласта при разных значениях исходной температуры и давления в пласте. Штриховые линии, параллельные оси абсцисс и являющиеся горизонтальными асимптотами сплошных кривых, показывают равновесные давления p_{s0} , соответствующие исходным температурам пласта. Из данного рисунка видно, что для высокопроницаемой среды значение критического давления практически совпадает со значением соответствующего равновесного давления. При уменьшении проницаемости величина критического давления возрастает, причем тем быстрее, чем выше исходная пластовая температура и чем ниже исходное пластовое давление. Таким образом, режим с фронтальной поверхностью образования гидрата реализуется при малой интенсивности инъекции холодного газа в низкопроницаемую пористую среду, исходное давление и температура в которой далеки от условий образования газового гидрата (т.е. в высокотемпературных пластах с низким пластовым давлением).

Заключение

На основе анализа решений задачи об инъекции газа в пористую среду, насыщенную газом и водой, установлено, что при закачке холодного газа образование газогидрата в пористой среде может происходить как на фронтальной поверхности, так и в протяженной области. Показано, что режим с фронтальной поверхностью образования гидрата характерен для низкопроницаемых пористых сред с низким пластовым давлением и высокой начальной температурой. В случае нагнетания газа под давлением ниже значения равновесного давления, соответствующего исходной температуре пласта, образование газогидрата может происходить только на фронтальной поверхности.

Литература

- [1] Бык, С.Ш. Газовые гидраты / С.Ш. Бык, Ю.Ф. Макогон, В.И. Фомина. – М.: Химия, 1980. – 296 с.
- [2] Jadhawar, P. Subsurface carbon dioxide storage through clathrate hydrate formation / P. Jadhawar, A.H. Mohammadi, J. Yang // *Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide*. – Springer. Printed in the Netherlands. – 2006. – P. 111–126.
- [3] Истомин, В.А. Газовые гидраты в природных условиях / В.А. Истомин, В.С. Якушев. – М.: Недра, 1992. – 236 с
- [4] Нигматулин, Р.И. Автомодельная задача о разложении газогидратов в пористой среде при депрессии и нагреве / Р.И. Нигматулин, В.Ш. Шагапов, В.Р. Сыртланов // *ПМТФ*. – 1998. – Т. 39. – №3. – С. 111–118.
- [5] Шагапов, В.Ш. Нагнетание газа в пористый резервуар, насыщенный газом и водой / В.Ш. Шагапов, Н.Г. Мусакаев, М.К. Хасанов // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2005. – Т. 12. – №4. – С. 645–656.

Поступила в редакцию 15/XI/2007;
в окончательном варианте — 15/XI/2007.

GAS INJECTION IN THE POROUS MEDIUM WITH FORMATION OF GASHYDRATE

© 2008 M.K. Khasanov²

The particularities of the formation gas hydrate at injection of the gas into porous media, in initial condition filled by gas and water are considered. The hydrate can be forming on frontal surface and in longitude area. The conditions, under which each hydrate forming mode is realized are defined.

Keywords: *porous medium, formation of gashydrate.*

Paper received 15/XI/2007.

Paper accepted 15/XI/2007.

²Khasanov Marat Kamilovich (hasanovmk@mail.ru), Dept. of Applied Mathematics and Mechanics, Sterlitamak state teacher training academy, Sterlitamak, 453103, Russia