

УДК 532.546; 536.421

ДИНАМИКА ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОГИДРАТА В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ ПРИ ИНЖЕКЦИИ ГАЗА

М. К. Хасанов, Н. Г. Мусакаев

Стерлитамакская государственная педагогическая академия, Стерлитамак;
Тюменский филиал ИТПМ СО РАН, Тюмень

Аннотация. Рассматриваются особенности образования газовых гидратов при инжекции газа в пористую среду, в исходном состоянии заполненную газом и водой. Построены автомодельные решения осесимметричной задачи, описывающие распределения основных параметров в пласте. Установлено, что существуют решения, согласно которым образование газогидрата может происходить как на фронтальной поверхности, так и в протяженной области.

Ключевые слова: газовые гидраты, фильтрация, гидратообразование, автомодельное решение, численное исследование

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 [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, посвящены работы [4, 5]. В работе [6] проведено исследование некоторых аспектов процесса образования газогидрата в пористой среде в плоскоодномерном приближении. В этой статье показано существование решений, согласно которым образование гидрата может происходить как на поверхности фазовых переходов, так и в объемной области. В осесимметричном приближении рассмотрены особенности образования газогидрата при нагнетании газа в пористый пласт, заполненный в исходном состоянии газом и водой.

2. Основные уравнения

Для описания процессов теплопереноса при закачке газа в горизонтальный пористый пласт примем следующие допущения. Процесс одно-температурный, то есть температуры пористой среды и насыщающего вещества (газа, гидрата или воды) совпадают. Гидрат является двух-компонентной системой с массовой концентрацией газа G . Кроме того, скелет пористой среды, газогидрат и вода несжимаемы и неподвижны, пористость постоянна, газ является калорически совершенным. Как показывают оценки, при небольших значениях исходной водонасыщенности пласта (например, менее 0.5) скорость фильтрации газа более, чем на два порядка превышает скорость фильтрации воды, поэтому двухфазную фильтрацию воды и газа в этом случае можно заменить однофазной фильтрацией газа. В рамках отмеченных допущений запишем для осесимметричной задачи уравнения сохранения массы, притока тепла (без учета баротермического эффекта) и закон Дарси:

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

Здесь m — пористость; p — давление; T — температура; ρ_j и S_j — истинная плотность и насыщенность пор j -ой 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; ρ_s и λ — удельная объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности системы. Будем пренебрегать переменностью объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности системы, так как основной вклад в эти величины вносят параметры скелета пористой среды.

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 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:

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

Здесь $[\psi]$ — скачок параметра ψ на границе r_i между областями; $\dot{r}_{(i)}$ — 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: $t = 0 : T = T_0, p = p_0 \quad (r \geq r_w)$.

Пусть через скважину, вскрывшую пласт на всю толщину, закачивается газ (одноименный исходному) с постоянным массовым расходом Q_g (на единицу высоты скважины) при постоянной температуре T_w . В результате закачки газа вблизи скважины образуется область, насыщенная газом и гидратом. Рассматривая достаточно большие времена после начала нагнетания газа, когда размеры данной области значительно превышают радиус скважины, условия на границе скважины с учетом закона Дарси и уравнения состояния для газа можно записать в виде:

$$r = r_w : -\frac{k_g \pi}{\mu_g R_g T_w} \left(r \frac{\partial p^2}{\partial r} \right) = Q_g, \quad T = T_w \quad (r_w \rightarrow 0, t > 0).$$

Сформулированная таким образом задача имеет автомодельное решение.

3. Результаты расчетов

Исследуем существование решений с фронтальной поверхностью образования гидратов. В данном случае возникает 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.

Введем автомодельную переменную

$$\xi = \frac{r}{\sqrt{\aleph^{(T)} t}},$$

где $\aleph^{(T)}$ — коэффициент температуропроводности пласта.

На Рис. 1(а) представлены распределения температуры и давления при нагнетании газа (метана) с массовым расходом $Q_g = 0.02$ кг/(м·с) и с температурой $T_w = 278$ К в пласт с начальным давлением $p_0 = 4$ МПа и исходной водонасыщенностью $S_{l0} = 0.2$. 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

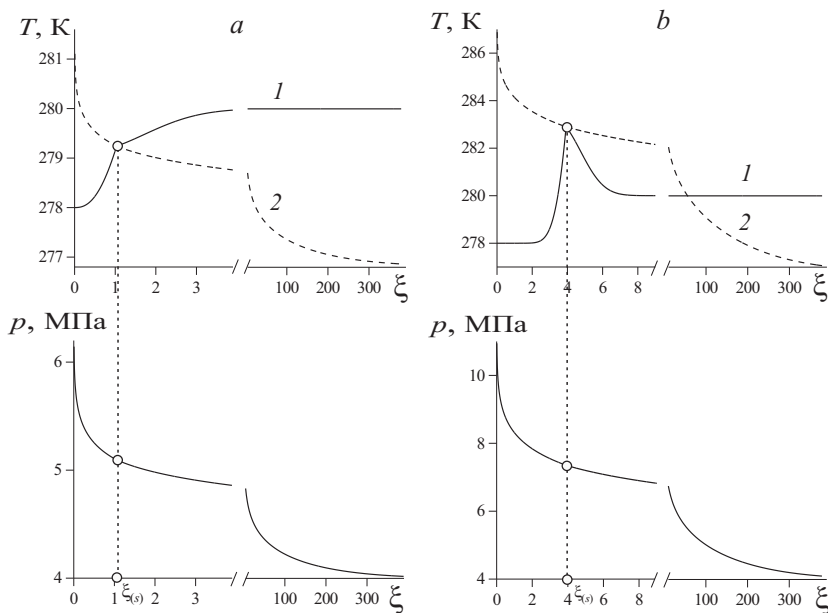


Рис. 1. Распределение температуры пласта (1), равновесной температуры (2) и давления. *a*) — непротиворечивый случай, *b*) — случай переохлаждения за фронтом

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 с массовым расходом $Q_g = 0.1$ кг/(м·с) и с температурой $T_w = 278$ К. Видно, что температура пласта за фронтом гидратообразования опускается ниже равновесной температуры (пунктирная линия 2), то есть в этой области наблюдается переохлаждение воды. Таким образом, при данном массовом расходе модель с фронтальной поверхностью образования гидрата не позволяет построить физически непротиворечивое решение. Для устранения этого противоречия необходимо вводить протяженную область гидратообразования.

Опираясь на результаты численных расчетов, можно сделать вывод о том, что для каждого значения проницаемости существует критическое значение Q_* массового расхода газа, при превышении которого возникает объемная область образования гидрата. На Рис. 2 при двух разных

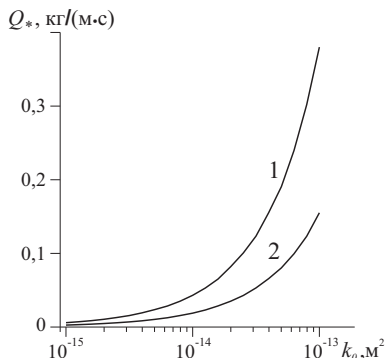


Рис. 2. Зависимость критического значения массового расхода от абсолютной проницаемости пласта. $S_{10} = 0.2$ (1) и 0.4 (2)

значениях исходной водонасыщенности пласта представлены данные зависимости.

Список литературы

- [1] Бык С. Ш., Макогон Ю. Ф., Фомина В. И. Газовые гидраты. М.: Химия, 1980. 296 с.
- [2] 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.
- [3] Истомин В. А., Якушев В. С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992. 236 с.
- [4] Нигматулин 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 Н. Г., Хасанов М. К. Нагнетание газа в пористый резервуар, насыщенный газом и водой // *Теплофизика и аэромеханика*. 2005. Т. 12, № 4. С. 645–656.