



Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

М. К. Хасанов, М. В. Столповский, И. К. Гималтдинов, Моделирование образования газогидрата при инъекции углекислого газа в природный пласт,
Прикл. мех. техн. физ., 2018, том 59, выпуск 3, 94–102

<https://www.mathnet.ru/pmtf577>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.84

17 апреля 2025 г., 17:23:30



УДК 622.279.72

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОГИДРАТА ПРИ ИНЖЕКЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ПРИРОДНЫЙ ПЛАСТ

М. К. Хасанов, М. В. Столповский*, И. К. Гималтдинов*

Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета,
453103 Стерлитамак, Россия

* Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450062 Уфа, Россия
E-mails: hasanovmk@mail.ru, s.maxim.pmm@mail.ru, iljas_g@mail.ru

Приведены результаты численного моделирования процесса образования газогидрата при закачивании углекислого газа в пласт конечной протяженности, насыщенный метаном и водой. Показано, что на различных этапах процесс гидратообразования может происходить как на фронтальной поверхности, так и в области пласта конечной протяженности. Исследовано влияние давления на границах пласта, а также проницаемости и начальной водонасыщенности пласта на процесс гидратообразования. Получена зависимость времени полного перехода воды в газогидратное состояние во всем пласте от давления инжекции и проницаемости пласта.

Ключевые слова: пористая среда, газовый гидрат, фильтрация, углекислый газ.

DOI: 10.15372/PMTF20180310

Введение. В настоящее время важной задачей уменьшения антропогенного воздействия на климат является сокращение выбросов диоксида углерода в атмосферу. Один из способов решения этой задачи заключается в улавливании выработанного промышленными объектами углекислого газа и его дальнейшем закачивании в геологические формирования для долгосрочного хранения [1–4]. При этом с целью уменьшения риска утечки диоксида углерода рассматривается вариант его консервации в твердом газогидратном состоянии, что позволяет хранить диоксид углерода при достаточно малых давлениях [5–8].

Результаты экспериментального исследования процесса образования газогидрата диоксида углерода приведены, в частности, в работах [6, 9–14]. Данные исследования проводились в реакторах, обеспечивающих быстрое увеличение давления, поэтому полученные результаты описывают особенности процессов гидратообразования, зависящие от их кинетики. Поскольку скорость течений в реальных протяженных природных пластах очень мала, интенсивность образования газогидрата в этих случаях ограничивается прежде всего скоростью фильтрации диоксида углерода в пласте. Таким образом, актуальной задачей является построение адекватных математических моделей гидратообразования, учитывающих тепломассоперенос в пористой среде.

Математические модели образования газогидратов в протяженных пористых пластах при инжекции газа сформулированы, в частности, в работах [15, 16]. Однако в данных

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Республики Башкортостан (код проекта 17-48-020123 р-а).

работах в качестве инжектируемого газа рассматривается тот же газ, который насыщает пласт в начальном состоянии. В работе [17] представлена математическая модель инъекции углекислого газа в пласт, содержащий метан и воду в свободном состоянии, и получены приближенные решения задачи в автомодельном приближении для полубесконечного пласта. В данной работе, в отличие от [17], рассматривается пласт конечной протяженности и исследуется влияние давления на его внешней границе, а также длительности инъекции углекислого газа на процесс гидратообразования.

Постановка задачи. Пусть горизонтальный пористый пласт длиной L в начальный момент времени насыщен водой и метаном, давление p_0 и температура T_0 которых соответствуют термодинамическим условиям существования газогидрата углекислого газа.

Равновесные температура T и давление p образования газогидрата углекислого газа при малых изменениях температуры связаны соотношением [18]

$$T = T_{s0} + T_* \ln(p/p_{s0}), \quad (1)$$

где p_{s0} — равновесное давление, соответствующее температуре T_{s0} ; T_* — эмпирический параметр.

С учетом (1) начальные термобарические параметры пласта удовлетворяют условиям

$$t = 0: \quad T = T_0, \quad p = p_0, \quad T_0 < T_{s0} + T_* \ln(p_0/p_{s0}) \quad (x > 0, t = 0).$$

Пусть через левую границу пористого пласта ($x = 0$) начинает закачиваться углекислый газ с температурой T_w и давлением p_w , соответствующими условиям образования его газогидрата.

В данной работе рассматривается случай, когда процесс гидратообразования ограничивается не кинетическими механизмами, а скоростью фильтрационного массопереноса в пористой среде. Это справедливо для пластов большой протяженности и масштабов времени, значительно превышающих характерное время кинетики процесса. Также будем пренебрегать диффузионным перемешиванием углекислого газа и метана, так как вследствие непрерывного закачивания диоксида углерода в пласт интенсивность массопереноса, обусловленного фильтрацией в проницаемой пористой среде, значительно превышает интенсивность массопереноса, обусловленного диффузией [19]. Кроме того, фронт области вытеснения метана диоксидом углерода можно считать устойчивым вследствие ламинарного характера течений в пористых средах, а также большей вязкости углекислого газа по сравнению с вязкостью метана [17]. Тогда, учитывая, что в рассматриваемой задаче начальное состояние пласта соответствует условиям образования газогидрата диоксида углерода, можно полагать, что образование газогидрата происходит на границе области вытеснения метана углекислым газом. Следовательно, в рассматриваемом случае в пласте образуются две характерные области. В первой (ближней) области поры насыщены углекислым газом и его газогидратом, во второй (дальней) — метаном и водой. При этом газогидрат диоксида углерода образуется на подвижной межфазной поверхности $x = x(n)$, разделяющей первую и вторую области.

Основные уравнения. Для описания процессов тепломассопереноса при закачивании углекислого газа в пористый пласт примем следующие допущения. Скелет пористой среды и газогидрат несжимаемы, пористость постоянна, метан и углекислый газ являются калорически совершенными газами. Значения температуры пористой среды и насыщающего ее вещества совпадают. Газогидрат диоксида углерода представляет собой двухкомпонентную систему с массовой концентрацией углекислого газа G . В данной работе рассматривается случай, когда исходная водонасыщенность пласта не превышает 0,2 и поэтому движением воды можно пренебречь.

С учетом принятых допущений система основных уравнений, описывающая процессы фильтрации и теплопереноса в пористой среде и представляющая собой законы сохранения

масс и энергии, закон Дарси и уравнение состояния, в случае прямолинейно-параллельного движения имеет вид [15–17, 20]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_i \varphi S_i) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_i \varphi S_i v_i) &= 0, \\ \rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_i C_i \varphi S_i v_i \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho_i \varphi S_i C_i \eta \frac{\partial p}{\partial t} &= 0, \\ \varphi S_i v_i &= -\frac{k_i}{\mu_i} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad \rho_i = \frac{p}{R_{gi} T}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь нижние индексы $i = c, m$ соответствуют параметрам углекислого газа и метана; φ — пористость; $\rho_i, v_i, k_i, C_i, R_{gi}, \mu_i$ — истинная плотность, скорость, проницаемость, удельная массовая теплоемкость, газовая постоянная и динамическая вязкость i -й фазы соответственно; p — давление; T — температура; S_i — насыщенность пор i -й фазой; η — коэффициент адиабатического расширения; $\rho C, \lambda$ — удельная объемная теплоемкость и теплопроводность системы. Поскольку основной вклад в величины ρC и λ вносят параметры скелета пористой среды (горной породы), будем считать их постоянными.

Зависимость коэффициента фазовой проницаемости k_i для углекислого газа и метана от их насыщенности S_i и абсолютной проницаемости пласта k_0 можно задать формулой Козени

$$k_i = k_0 S_i^3 \quad (i = c, m).$$

На границе между первой и второй областями выполняются соотношения, следующие из условий баланса массы и тепла:

$$\begin{aligned} -\frac{k_c}{\mu_c} \frac{\partial p_{(1)}}{\partial x} &= \varphi \left(\frac{\rho_h}{\rho_c} S_{h(1)} G + S_c \right) \dot{x}_{(n)}, & -\frac{k_m}{\mu_m} \frac{\partial p_{(2)}}{\partial x} &= \varphi S_m \dot{x}_{(n)}, \\ \varphi S_{h(1)} \rho_h (1 - G) \dot{x}_{(n)} &= \varphi S_{l0} \rho_l \dot{x}_{(n)}, & \lambda \frac{\partial T_{(1)}}{\partial x} - \lambda \frac{\partial T_{(2)}}{\partial x} &= \varphi \rho_h L_h S_{h(1)} \dot{x}_{(n)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь ρ_h, ρ_l — плотность газогидрата и воды; $S_{h(1)}$ — гидратонасыщенность пласта в первой области; L_h — теплота образования газогидрата углекислого газа; $p_{(j)}, T_{(j)}$ — давление и температура в первой ($j = 1$) и второй ($j = 2$) областях; S_{l0} — начальная водонасыщенность пласта; $\dot{x}_{(n)}$ — скорость движения границы области гидратообразования. Температуру и давление на этой границе будем считать непрерывными. Здесь и далее нижний индекс n соответствует параметрам на границе между первой и второй областями.

Из третьего уравнения системы (3) для величины гидратонасыщенности в первой области получаем

$$S_{h(1)} = \frac{\rho_l S_{l0}}{\rho_h (1 - G)}.$$

Тогда величина газонасыщенности в первой области равна

$$S_c = 1 - \frac{\rho_l S_{l0}}{\rho_h (1 - G)}.$$

В рассматриваемой задаче перепады температуры ΔT в области фильтрации небольшие ($\Delta T \ll T_0$). Поэтому в уравнении пьезопроводности слагаемое, описывающее зависимость давления от температуры, пренебрежимо мало. С учетом этого и с использованием системы (2) уравнения пьезопроводности и температуропроводности записываются в виде

$$\frac{\partial p_{(j)}}{\partial t} = \chi_{(j)} \frac{\partial}{\partial x} \left(p_{(j)} \frac{\partial p_{(j)}}{\partial x} \right) \quad (j = 1, 2); \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_{(j)}}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T_{(j)}}{\partial x} \right) + \alpha_{(j)} \frac{p_{(j)}}{T_{(j)}} \frac{\partial p_{(j)}}{\partial x} \frac{\partial T_{(j)}}{\partial x} \quad (j = 1, 2), \quad (5)$$

где

$$\alpha_{(1)} = \frac{C_c k_c}{\mu_c R_{gc} \rho C}, \quad \alpha_{(2)} = \frac{C_m k_m}{\mu_m R_{gm} \rho C}, \quad \chi_{(1)} = \frac{k_c}{\mu_c \varphi S_c}, \quad \chi_{(2)} = \frac{k_m}{\mu_m \varphi S_m}.$$

Начальные и граничные условия для рассматриваемой задачи представим в виде [16, 20]

$$t = 0: \quad T = T_0, \quad p = p_0 \quad (x \geq 0); \quad (6)$$

$$x = 0: \quad T = T_w, \quad p = p_w \quad (t > 0); \quad (7)$$

$$x = L: \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad p = p_0 \quad (t > 0). \quad (8)$$

Для получения решения задачи (4), (5) с начально-граничными условиями (6)–(8) и условиями (3) на подвижной границе области фазового перехода строится равномерная сетка с шагом h . Поскольку решение находится в областях с одной неизвестной подвижной границей, используется метод ловли фронта в узел пространственной сетки [16], в соответствии с которым неизвестный временной шаг τ_{j+1} выбирается таким образом, чтобы граница области фазового перехода перемещалась по координате x на один шаг: $x_{(n)}(t_{j+1}) - x_{(n)}(t_j) = h$. Уравнениям (4), (5), описывающим распределения давления и температуры, а также условиям (3) на подвижной границе ставятся в соответствие неявные дискретные аналоги. Полученная таким образом система алгебраических уравнений на каждом временном слое решается с помощью метода простых итераций в сочетании с алгоритмом прогонки. При этом на начальной итерации задаются лишь распределения давления и температуры, а также временной шаг. Из уравнения пьезопроводности (4) с граничными условиями (7) и первого уравнения системы (3) вычисляется распределение давления в первой области (насыщенной углекислым газом), а с использованием найденного значения давления на границе и условия (8) — распределение давления во второй зоне (насыщенной метаном). При этом распределение температуры в обеих областях находится из уравнения теплопроводности (5) с учетом четвертого уравнения системы (3) на границе области фазового перехода. Окончательно решение на временном шаге получается в результате решения второго уравнения системы (3). На каждом временном слое данный процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность по давлению и температуре пласта.

Результаты расчетов. На рис. 1 представлены распределения температуры и давления в пласте в различные моменты времени после начала инжекции. Штриховой линией показана равновесная температура образования газогидрата диоксида углерода, соответствующая вычисленному давлению. Здесь и далее (за исключением случаев, оговоренных особо) для параметров модели приняты следующие значения: $L = 100$ м, $\varphi = 0,1$, $S_{l0} = 0,18$, $p_0 = 2,75$ МПа, $p_w = 3,4$ МПа, $T_w = 276$ К, $T_0 = 276$ К, $k_0 = 5 \cdot 10^{-14}$ м², $G = 0,28$, $\lambda = 2$ Вт/(м·К), $\rho C = 2,5 \cdot 10^6$ Дж/(К·кг), $\rho_h = 1100$ кг/м³, $\rho_l = 1000$ кг/м³, $C_c = 800$ Дж/(К·кг), $C_m = 1560$ Дж/(К·кг), $R_c = 189$ Дж/(К·кг), $R_m = 520$ Дж/(К·кг), $\mu_c = 1,3 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\mu_m = 10^{-5}$ Па·с, $L_h = 4,2 \cdot 10^5$ Дж/кг, $T_{s0} = 276$ К, $p_{s0} = 1,76$ МПа, $T_* = 8,1$ К.

На рис. 1 видно, что рассматриваемый процесс образования гидрата сопровождается увеличением температуры пласта вследствие выделения скрытой теплоты. При этом при малых значениях времени после начала инжекции термобарические условия в первой области пласта соответствуют условиям существования газогидрата углекислого газа, так

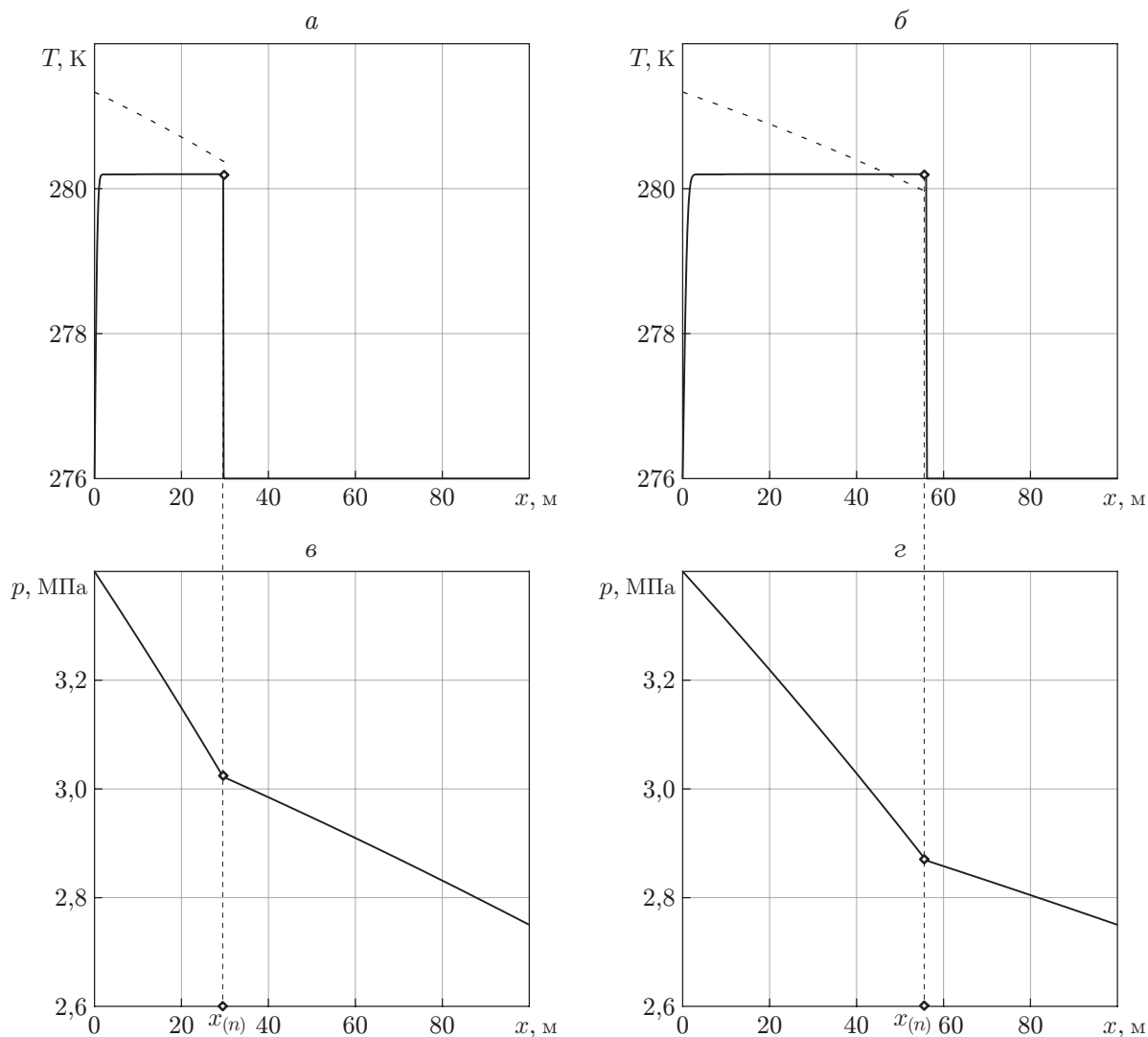


Рис. 1. Распределения температуры, давления (сплошные линии) и равновесной температуры (штриховая линия) в различные моменты времени после начала инъекции:

a, в — $t = 2$ сут, *б, г* — $t = 5$ сут

как температура пласта в этой области меньше равновесной температуры гидратообразования (см. рис. 1, *a*). Следовательно, при малых значениях времени модель с фронтальной поверхностью гидратообразования позволяет получить термодинамически непротиворечивое решение. При бóльших значениях времени температура пласта на некотором участке первой области может оказаться больше равновесной температуры гидратообразования (см. рис. 1, *б*). Это обусловлено тем, что с течением времени фронт области гидратообразования перемещается в область с меньшим давлением. Таким образом, при достаточно больших значениях времени после начала инъекции фронтальная поверхность гидратообразования может переходить в область конечной протяженности, в которой происходят фазовые превращения.

На рис. 2 приведены зависимости температуры на фронте области гидратообразования и его координаты от давления инъекции при значениях абсолютной проницаемости пласта $k_0 = 2,0 \cdot 10^{-15}$, $0,8 \cdot 10^{-15}$ м² для момента времени $t = 10$ сут после нача-

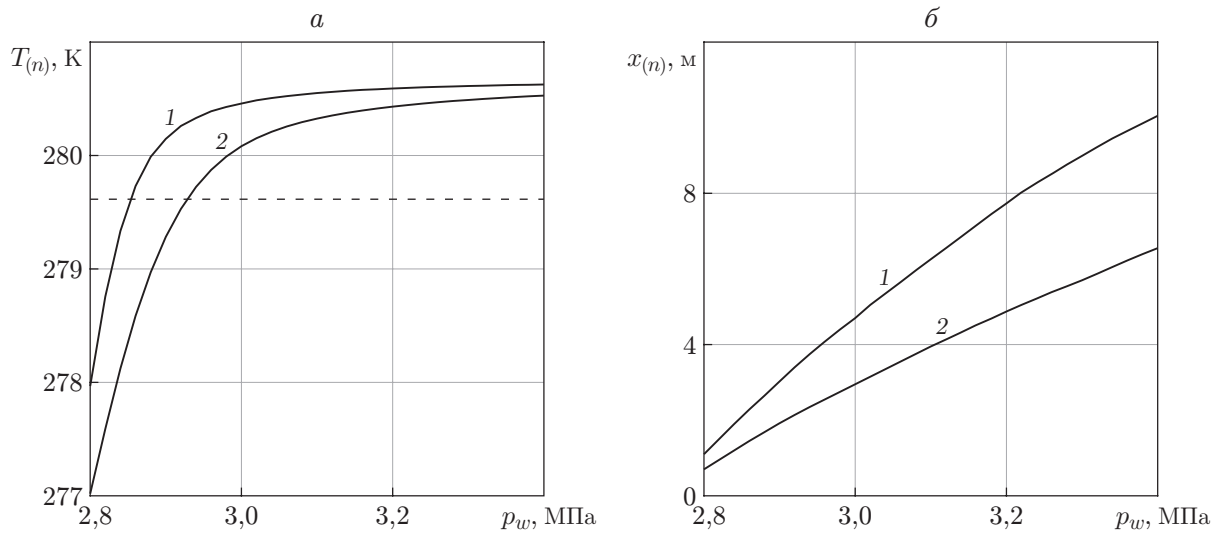


Рис. 2. Зависимости температуры на фронте области гидратообразования (а) и его координаты (б) от давления инъекции при различных значениях абсолютной проницаемости пласта:
 1 — $k_0 = 2 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, 2 — $k_0 = 0,8 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$; штриховая кривая — равновесная температура гидратообразования, соответствующая давлению на внешней границе пласта

ла инъекции. Штриховой кривой показана равновесная температура гидратообразования, соответствующая давлению на внешней границе пласта (минимально возможное значение равновесной температуры гидратообразования в рассматриваемой задаче). Исходная водонасыщенность пласта принята равной $S_{l0} = 0,2$. При достаточно малых значениях давления инъекции и проницаемости пласта температура на фронте области гидратообразования не превышает минимальной равновесной температуры гидратообразования (см. рис. 2, а). Следовательно, в любой момент времени газогидрат образуется на фронтальной поверхности. Это обусловлено тем, что в данном случае фронт области гидратообразования находится вблизи левой границы пласта. При этом через данную границу более эффективно отводится тепло, выделяющееся на фронте области, в которой образуется газогидрат углекислого газа (см. рис. 2, б).

На рис. 3 представлена зависимость температуры на фронте области гидратообразования от давления на внешней границе пласта при значениях начальной водонасыщенности $S_{l0} = 0,12; 0,15$ в момент времени $t = 1$ сут после начала инъекции. Для проницаемости пласта и давления инъекции приняты значения $k_0 = 0,5 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, $p_w = 3 \text{ МПа}$. Температура на фронте области фазовых переходов меньше минимальной равновесной температуры гидратообразования (что соответствует режиму, при котором в любой момент времени гидратообразование происходит на фронтальной поверхности) только при достаточно больших значениях давления на внешней границе и малых значениях исходной водонасыщенности пласта (см. рис. 3). Это обусловлено тем, что при увеличении давления на внешней границе пласта увеличивается равновесная температура гидратообразования, а при уменьшении начальной водонасыщенности пласта уменьшаются интенсивность выделения скрытой теплоты гидратообразования и температура на фронте области гидратообразования.

На рис. 4, 5 приведены зависимости времени полного перехода воды в газогидратное состояние во всем пласте от давления инъекции при значениях давления на внешней границе $p_0 = 2,75; 2,95 \text{ МПа}$, а также от абсолютной проницаемости пласта при значениях

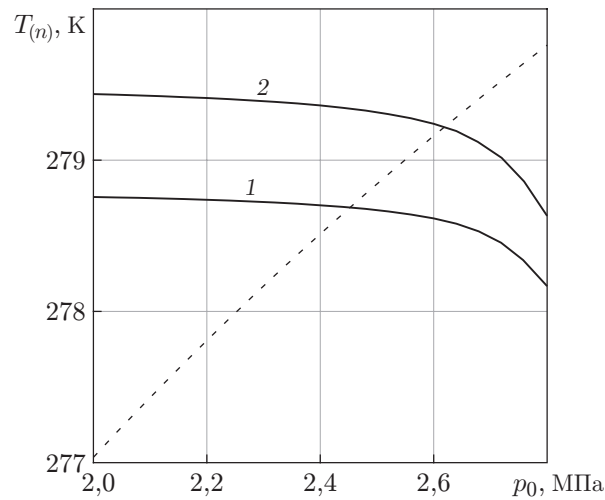


Рис. 3. Зависимость температуры на фронте области гидратообразования от давления на внешней границе пласта при различных значениях начальной водонасыщенности:

1 — $S_{l0} = 0,12$, 2 — $S_{l0} = 0,15$; штриховая кривая — равновесная температура гидратообразования, соответствующая давлению на внешней границе пласта

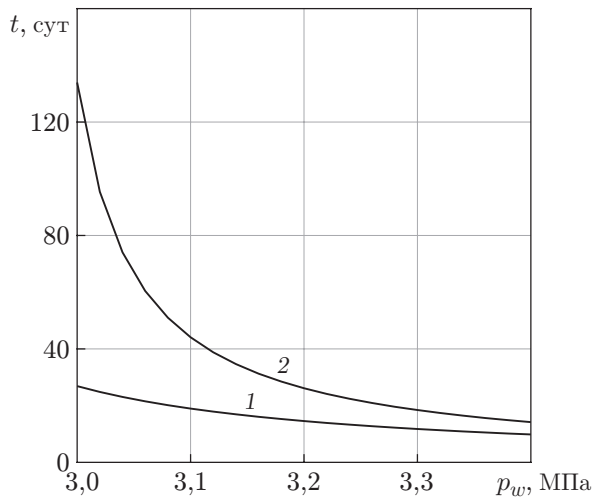


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость времени полного перехода воды в газогидратное состояние во всем пласте от давления инъекции при различных значениях давления на внешней границе:

1 — $p_0 = 2,75$ МПа, 2 — $p_0 = 2,95$ МПа

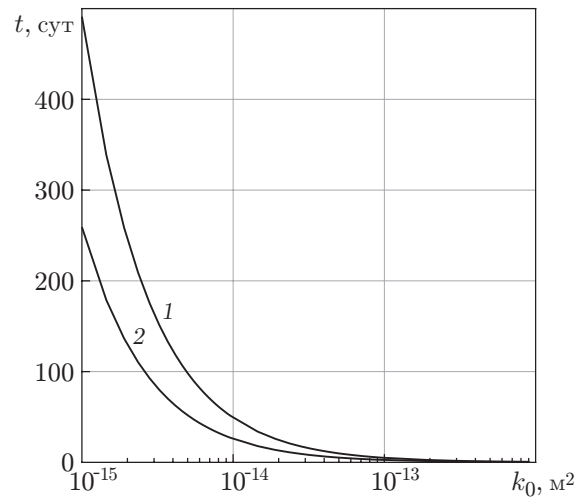


Рис. 5

Рис. 5. Зависимость времени полного перехода воды в газогидратное состояние во всем пласте от абсолютной проницаемости пласта при различных значениях исходной водонасыщенности пласта:

1 — $S_{l0} = 0,15$, 2 — $S_{l0} = 0,05$

исходной водонасыщенности пласта $S_{l0} = 0,15; 0,05$. В расчетах приняты следующие значения параметров модели: $k_0 = 5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$, $S_{l0} = 0,15$, $p_w = 3,4 \text{ МПа}$, $p_0 = 2,75 \text{ МПа}$ (значения всех параметров соответствуют режиму гидратообразования на фронтальной поверхности). Из рис. 4, 5 следует, что время полного перехода воды в газогидратное состояние во всем пласте уменьшается с увеличением давления инъекции и абсолютной проницаемости пласта и увеличивается с увеличением давления на внешней границе пласта и начальной водонасыщенности. Это обусловлено тем, что в рассматриваемом случае интенсивность гидратообразования ограничена скоростью фильтрации диоксида углерода в пласте, которая прямо пропорциональна перепаду давления в пласте $\Delta p = p_w - p_0$ и фазовой проницаемости для углекислого газа.

Заключение. Из анализа полученных численных решений следует, что в случае инъекции углекислого газа в пласт, насыщенный метаном и водой, в зависимости от длительности инъекции гидратообразование может происходить как на фронтальной поверхности, так и в области пласта конечной протяженности. Режим, при котором фазовые переходы происходят на фронтальной границе, реализуется при малых значениях проницаемости, исходной водонасыщенности и давления инъекции, а также при больших значениях давления на внешней границе пласта. В режиме образования газогидрата на фронтальной поверхности время полного перехода воды в газогидратное состояние во всем пласте уменьшается с увеличением проницаемости и перепада давления в пласте.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bradshaw J., Cook P.** Geological sequestration of carbon dioxide // *Environ. Geosci.* 2001. V. 8, N 3. P. 149–151.
2. **Oldenburg C. M., Pruess R., Benson S. M.** Process modeling of CO₂ injection into natural gas reservoirs for carbon sequestration and enhanced gas recovery // *Energy Fuel.* 2001. V. 15. P. 293–298.
3. **Benson S. M., Cole D. R.** CO₂ sequestration in deep sedimentary formations // *Elements.* 2008. V. 4. P. 325–331.
4. **Lombardi S.** Advances in the geological storage of carbon dioxide / S. Lombardi, L. K. Altunina, S. E. Beaubien. Berlin: Springer Publ., 2006.
5. **Wright J. F., Cote M. M., Dallimore S. R.** Overview of regional opportunities for geological sequestration of CO₂ as gas hydrate in Canada // *Proc. of the 6th Intern. conf. on gas hydrates, Vancouver (Canada), July 6–10, 2008.* Vancouver: S. n., 2008.
6. **Чувилин Е. М., Гурьева О. М.** Экспериментальное изучение образования гидратов CO₂ в поровом пространстве промерзающих и мерзлых пород // *Криосфера Земли.* 2009. Т. 13, № 3. С. 70–79.
7. **Дучков А. Д., Соколова Л. С., Аюнов Д. Е., Пермяков М. Е.** Оценка возможности захоронения углекислого газа в криолитозоне Западной Сибири // *Криосфера Земли.* 2009. Т. 13, № 4. С. 62–68.
8. **Sloan E. D.** Clathrate hydrates of natural gases / E. D. Sloan, C. A. Koh. Boca Raton: CRC Press, 2007.
9. **Донцов В. Е., Чернов А. А., Донцов Е. В.** Ударные волны и образование гидрата углекислого газа при повышенном начальном давлении в газожидкостной среде // *Теплофизика и аэромеханика.* 2007. Т. 14, № 1. С. 23–39.
10. **Донцов В. Е., Чернов А. А.** Процессы растворения и гидратообразования за ударной волной в газожидкостной смеси // *Докл. АН.* 2009. Т. 425, № 6. С. 764–768.

11. **Dontsov V. E., Chernov A. A.** Dilution and hydrate forming process in shock waves // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2009. V. 52, N 21/22. P. 4919–4928.
12. **Yang M., Song Y., Zhao Y., et al.** MRI measurements of CO₂ hydrate dissociation rate in a porous medium // Magn. Reson. Imaging. 2011. V. 29. P. 1007–1013.
13. **Tohidi B., Anderson R., Clennell M. B., et al.** Visual observation of gas-hydrate formation and dissociation in synthetic porous media by means of glass micromodels // Geology. 2001. V. 29, N 9. P. 867–870.
14. **Zatsepina O. Y., Buffet B. A.** Nucleation of CO₂-hydrate in a porous medium // Fluid Phase Equilibria. 2002. N 200. P. 263–275.
15. **Хасанов М. К.** Исследование режимов образования газогидратов в пористой среде, частично насыщенной льдом // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 2. С. 255–266.
16. **Шагапов В. Ш., Хасанов М. К., Гималтдинов И. К., Столповский М. В.** Численное моделирование образования газогидрата в пористом пласте конечной протяженности при продувке его газом // ПМТФ. 2011. Т. 52, № 4. С. 116–126.
17. **Цыпкин Г. Г.** Образование гидрата углекислого газа при его инъекции в истощенное месторождение углеводородов // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2014. № 6. С. 101–108.
18. **Бык С. Ш.** Газовые гидраты / С. Ш. Бык, Ю. Ф. Макогон, В. И. Фомина. М.: Химия, 1980.
19. **Collins R. E.** Flow of fluids through porous materials. N. Y.: Reinhold Publ. Corp., 1961.
20. **Хабибуллин И. Л., Хамитов А. Т., Назмутдинов Ф. Ф.** Моделирование процессов тепло- и массопереноса в пористых средах при фазовых превращениях, инициируемых микроволновым нагревом // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52, № 5. С. 727–733.

Поступила в редакцию 15/VI 2017 г.
