

УДК 622.279.72

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНЖЕКЦИИ ЖИДКОГО ДИОКСИДА СЕРЫ В ПОРИСТЫЙ ПЛАСТ, НАСЫЩЕННЫЙ МЕТАНОМ И ВОДОЙ

М. К. Хасанов, М. В. Столповский*

Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета,
453103 Стерлитамак, Россия

* Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450080 Уфа, Россия
E-mails: hasanovmk@mail.ru, s_maxim.pmm@mail.ru

Представлены результаты численного моделирования инъекции жидкого диоксида серы в пористый пласт, сопровождающейся образованием газогидрата диоксида серы. Рассмотрен случай, когда пласт изначально насыщен метаном и водой, имеет конечную протяженность и непроницаемую внешнюю границу. Показано, что на начальном этапе в зависимости от проницаемости пористой среды и давления процесс вытеснения метана из пласта может либо сопровождаться образованием газогидрата метана, либо происходить без его образования. Установлено, что с течением времени термодинамические условия в области фильтрации метана становятся близкими к условиям образования его газогидрата.

Ключевые слова: газовые гидраты, фильтрация, диоксид серы, метан.

DOI: 10.15372/PMTF20200310

Введение. В настоящее время степень загрязнения воздуха сернистым ангидридом, который является очень токсичным соединением, во многих населенных пунктах российского Предполярья и Заполярья оценивается как очень высокая, поскольку в этом регионе сконцентрированы мощные источники диоксида серы антропогенного происхождения, связанные с объектами энергетики и металлургии. Поскольку рассеивание диоксида серы в атмосфере через высотные трубы приводит к ее загрязнению и кислотным дождям, одним из вариантов уменьшения эмиссии сернистого ангидрида в атмосферу является его подземное захоронение [1–3]. Однако недостатком этого метода, препятствующим его использованию, является то, что при долгосрочном подземном хранении сернистого ангидрида в виде флюида возможен его трансграничный перенос или утечка на поверхность. Одним из способов минимизации этого риска является подземное хранение газа в газогидратном состоянии [4–11]. В присутствии воды диоксид серы подобно некоторым другим газам при понижении температуры или повышении давления может образовывать твердое соединение с водой (газогидрат) [4]. Важным свойством газогидрата является способность связывать огромное количество газа в малом объеме при сравнительно небольших значениях давления. Указанные свойства позволяют значительно уменьшить риск трансграничных

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 19-08-00967).

переносов или утечки на поверхность диоксида серы при его подземном хранении в твердом газогидратном состоянии. В России крупнейшие промышленные источники SO_2 находятся в районах распространения вечной мерзлоты. Поэтому использование в качестве геологических объектов для длительного хранения диоксида серы коллекторов, перекрытых “экранирующим” слоем сплошной мерзлоты, где термобарические условия благоприятны для существования газогидрата сернистого ангидрида, является дополнительным фактором, повышающим надежность хранения. О надежности и безопасности долгосрочного подземного хранения сернистого ангидрида в газогидратном состоянии косвенно свидетельствует тот факт, что в условиях криолитозоны на различных глубинах залегания обнаружены большие природные скопления газогидрата метана, возраст которых оценивается в сотни тысяч лет. При этом область значений давления и температуры, при которых может стабильно существовать газогидрат диоксида серы, значительно больше, чем для газогидрата метана, что свидетельствует о возможности аналогичного длительного хранения диоксида серы в газогидратном состоянии. Например, в интервале температур $0 \div 10$ °С минимально необходимое для существования газогидрата метана давление составляет порядка 1 МПа, а для существования газогидрата диоксида серы достаточно давления порядка 0,1 МПа.

Некоторые особенности образования газогидратов экспериментально исследованы, например, в работах [12–14]. Следует отметить, что в этих и других экспериментальных работах исследования проводились в образцах малых размеров, в которых основным механизмом, ограничивающим скорость образования газогидрата, является кинетика процесса. Однако в протяженных природных пластах основными механизмами, лимитирующими интенсивность гидратообразования, являются тепло- и массоперенос. Математические модели процессов тепло-массопереноса в пласте, сопровождающихся образованием газогидрата, представлены в работах [15–18], в которых получены приближенные аналитические решения для пластов бесконечной протяженности. При этом автомодельные решения, полученные в [15–18], справедливы также для реальных пластов конечной длины, но лишь на начальных этапах процесса инжекции, когда возмущения давления, распространяющиеся от скважины, не достигают внешней границы пласта.

В настоящей работе рассматривается модельная задача об инжекции жидкого диоксида серы в природный пласт, имеющий конечную протяженность и непроницаемую внешнюю границу. Исследуются условия, при которых инжекция сопровождается образованием не только газогидрата диоксида серы, но и газогидрата метана.

Постановка задачи и основные уравнения. На рис. 1 представлена фазовая диаграмма для системы диоксид серы — вода [4]. Газогидрат SO_2 существует в области значений давления и температуры, расположенной выше кривой 1 и левее кривой 3. В точке Q_2 (верхней квадрупольной точке) с координатами $p_Q = 0,233$ МПа, $T_Q = 285,1$ К все четыре фазы (вода, газогидрат SO_2 , жидкий и газообразный диоксиды серы) находятся в состоянии равновесия.

Рассмотрим пористый пласт длиной l , в начальный момент времени насыщенный метаном и водой с начальной насыщенностью S_{w0} . Будем полагать, что в начальном состоянии температура T_0 и давление p_0 коллектора соответствуют условиям образования газогидрата диоксида серы. Через левую границу пласта инжектируется жидкий диоксид серы, давление p_e и температура T_e которого соответствуют условиям образования его газогидрата. Тогда в результате закачки диоксида серы из диоксида серы и воды образуется газогидрат SO_2 . Рассмотрим достаточно большие масштабы времени с момента начала закачки (несколько суток). В этом случае кинетикой процессов образования газогидрата можно пренебречь, а интенсивность гидратообразования будет лимитироваться скоростью тепло-массопереноса в пласте. Кроме того, как и в работах [15–18], границу

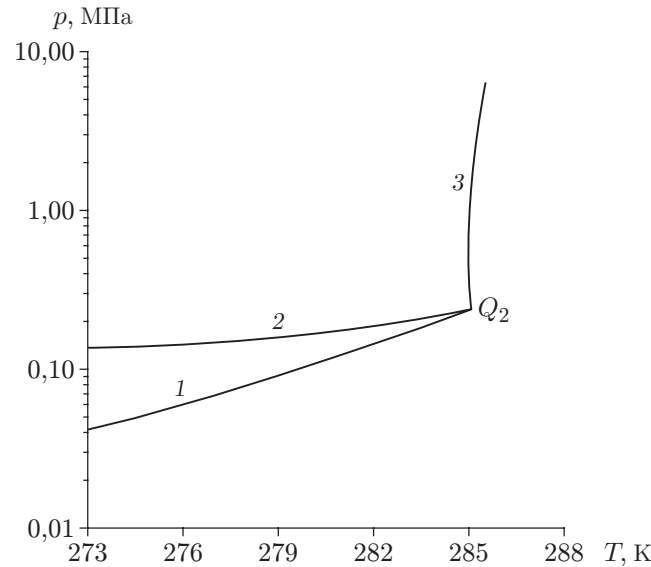


Рис. 1. Фазовая диаграмма для системы $\text{SO}_2\text{--H}_2\text{O}$:

1 — состояние равновесия между водой, газообразным диоксидом серы и газогидратом SO_2 ,
 2 — состояние равновесия между газообразным и жидким диоксидом серы, 3 — состояние равновесия между водой, жидким диоксидом серы и газогидратом SO_2

вытеснения метана диоксидом серы будем считать устойчивой. Это обусловлено тем, что вязкость жидкого диоксида серы больше вязкости метана и течения в природном пласте имеют ламинарный характер. В этом случае в пласте образуются две области: ближняя, содержащая диоксид серы и его газогидрат, и дальняя, насыщенная метаном и водой. При этом образование гидрата SO_2 происходит на подвижной фронтальной границе, совпадающей с фронтом вытеснения метана диоксидом серы.

Для описания процессов теплопереноса при закачивании жидкого диоксида серы в пористый пласт примем, что метан является калорически совершенным газом, а диоксид серы — упругой жидкостью. Гидрат SO_2 представляет собой двухкомпонентную систему с массовой долей газа-гидратообразователя, равной G .

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 плоскооднородном приближении имеет вид [15–18]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{(i)} \varphi S_{(i)}) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{(i)} \varphi S_{(i)} v_{(i)}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C T_{(i)}) + \rho_{(i)} C_{(i)} \varphi S_{(i)} v_{(i)} \frac{\partial T_{(i)}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T_{(i)}}{\partial x} \right);$$

$$\varphi S_{(i)} v_{(i)} = - \frac{k_{(i)}}{\mu_{(i)}} \frac{\partial p_{(i)}}{\partial x}; \quad (2)$$

$$\rho_s = \rho_{0s} \exp(\beta(p - p_0)), \quad \rho_m = p / (R_m T).$$

Здесь нижние индексы $i = m, s$ соответствуют метану и жидкому диоксиду серы; φ — пористость; $\rho_{(i)}$, $v_{(i)}$, $k_{(i)}$, $C_{(i)}$, $\mu_{(i)}$ — плотность, скорость, проницаемость, удельная теплоемкость и динамическая вязкость i -й фазы соответственно; p — давление; T — температура; $S_{(i)}$ — насыщенность пор i -й фазой; R_m — газовая постоянная метана; β — коэффициент объемного сжатия жидкого SO_2 ; ρ_{0s} — плотность жидкого диоксида серы, соответствующая давлению p_0 ; ρC , λ — удельная объемная теплоемкость и теплопроводность системы.

Поскольку основной вклад в значения ρC и λ вносят соответствующие параметры скелета пористой среды, будем полагать их постоянными величинами.

Зависимость коэффициента фазовой проницаемости $k_{(i)}$ от насыщенности $S_{(i)}$ и абсолютной проницаемости k_0 зададим следующим образом:

$$k_{(i)} = k_0 S_{(i)}^3 \quad (i = s, m).$$

На границе фазовых переходов выполняются соотношения, следующие из условий баланса массы метана и диоксида серы:

$$\varphi \rho_m S_m (v_m - x_{(n)}) = 0, \quad \varphi \rho_s S_s (v_s - x_{(n)}) = \varphi \rho_h S_h G x_{(n)} \quad (3)$$

(ρ_h, S_h — плотность и насыщенность гидрата SO_2 ; $x_{(n)}$ — скорость движения границы фазового перехода, температура и давление на которой полагаются непрерывными; нижний индекс n соответствует параметрам на поверхности между областями).

Поскольку начальная водонасыщенность полагается равной S_{w0} , из условия баланса массы воды в первой области для гидратонасыщенности S_h получаем

$$S_h = \frac{\rho_w S_{w0}}{\rho_h (1 - G)}$$

(ρ_w — плотность воды).

С учетом системы (3) и закона Дарси (2) уравнения баланса массы и тепла на границе фазового перехода $x = x_{(n)}$ можно представить в виде

$$\begin{aligned} -\frac{k_m}{\mu_m} \frac{\partial p_{(2)}}{\partial x} &= \varphi S_m x_{(n)}, & -\frac{k_s}{\mu_s} \frac{\partial p_{(1)}}{\partial x} &= \varphi \left(S_s + \frac{\rho_h G}{\rho_s} S_h \right) x_{(n)}, \\ \lambda \frac{\partial T_{(1)}}{\partial x} - \lambda \frac{\partial T_{(2)}}{\partial x} &= \varphi \rho_h L_h S_h x_{(n)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где L_h — теплота образования гидрата SO_2 ; нижние индексы $j = 1, 2$ соответствуют ближней и дальней областям.

С учетом непроницаемости внешней границы пласта начальные и граничные условия представим в виде

$$\begin{aligned} t = 0: & \quad p = p_0, \quad T = T_0 \quad (0 \leq x \leq l), \\ x = 0: & \quad p = p_e, \quad T = T_e \quad (t > 0), \\ x = l: & \quad \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (t > 0). \end{aligned} \quad (5)$$

С использованием первого уравнения системы (1) и с учетом закона Дарси (2), а также уравнения состояния получаем уравнения пьезопроводности, описывающие распределения давления в ближней ($j = 1$) и дальней ($j = 2$) областях:

$$\frac{\partial p_{(1)}}{\partial t} = \frac{k_s}{\varphi(1 - S_h)\rho_s\beta\mu_s} \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_s \frac{\partial p_{(1)}}{\partial r} \right); \quad (6)$$

$$\frac{\partial p_{(2)}}{\partial t} = \frac{k_m}{\varphi(1 - S_{w0})\mu_m} \frac{\partial}{\partial x} \left(p_{(2)} \frac{\partial p_{(2)}}{\partial x} \right). \quad (7)$$

Уравнение (7) получено в предположении, что изменения температуры ΔT в области фильтрации метана незначительны ($\Delta T \ll T$).

Аналогичным образом уравнение энергии (второе уравнение системы (1)) представим в виде

$$\frac{\partial T_{(j)}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\chi^{(T)} \frac{\partial T_{(j)}}{\partial x} \right) + X_{(j)} \frac{\partial p_{(j)}}{\partial x} \frac{\partial T_{(j)}}{\partial x}, \quad (8)$$

где $\chi^{(T)} = \lambda/(\rho C)$ — температуропроводность пласта; $X_{(1)} = \chi^{(T)}\rho_s C_s k_s/(\lambda\mu_s)$, $X_{(2)} = \chi^{(T)}\rho_m C_m k_m/(\lambda\mu_m)$.

Система уравнений (6)–(8) с начальными и граничными условиями (5), а также условиями (4) на подвижной границе фазовых переходов является замкнутой. Для ее решения используется метод “ловли” фронта в узел пространственной сетки [19], заключающийся в том, что в течение определенного в ходе решения задачи промежутка времени фронт фазового перехода перемещается по координатной сетке на один шаг.

Анализ результатов расчетов. Полученные численные решения исследовались с точки зрения выполнения условий термодинамической непротиворечивости, заключающихся в следующем. Поскольку согласно принятой схеме дальняя область насыщена гетерогенной смесью метана и воды в свободном (не газогидратном) состоянии, локальная температура в данной области должна быть выше равновесной температуры T_r находящейся в состоянии равновесия трехфазной системы метан — гидрат метана — вода при заданном давлении p . Для большинства газогидратов зависимость равновесной температуры от давления с высокой степенью точности можно аппроксимировать соотношением

$$T_r = T_{r0} + T_* \ln(p/p_{r0}), \quad (9)$$

где T_{r0} — равновесная температура, соответствующая давлению p_{r0} ; T_* — эмпирический параметр.

На рис. 2 приведены распределения температуры и давления в пласте для моментов времени $t = 40, 200$ сут. Для остальных параметров, характеризующих систему, приняты следующие значения: $l = 50$ м, $\varphi = 0,15$, $S_{w0} = 0,15$, $k_0 = 10^{-15}$ м², $\mu_s = 3,67 \cdot 10^{-4}$ Па·с, $\mu_m = 10^{-5}$ Па·с, $G = 0,371$, $\rho C = 2 \cdot 10^6$ Дж/(К·м³), $\lambda = 2$ Вт/(м·К), $\beta_s = 1,36 \cdot 10^{-9}$ Па⁻¹, $\rho_h = 1390$ кг/м³, $\rho_w = 1000$ кг/м³, $\rho_{0s} = 1433$ кг/м³, $C_s = 1340$ Дж/(К·кг), $C_m = 1560$ Дж/(К·кг), $L_h = 2,61 \cdot 10^5$ Дж/кг, $p_e = 4,8$ МПа, $p_0 = 4$ МПа, $T_e = 260$ К, $T_0 = 280$ К, $T_{r0} = 280$ К, $T_* = 10$ К, $p_{r0} = 5,5$ МПа. Как следует из рис. 2, а, в, при относительно малых значениях времени инъекции температура в области, насыщенной метаном и водой, выше равновесной температуры образования гидрата метана. Следовательно, на этом временном интервале образования газогидрата метана не происходит. С увеличением времени инъекции температура в дальней области становится меньше равновесной температуры образования гидрата метана (см. рис. 2, б, г). Следовательно, в этот момент времени возникает дополнительная граница фазовых переходов, на которой образуется газогидрат метана, и соответственно в пласте возникает дополнительная область, частично насыщенная газогидратом метана.

На рис. 3 представлена зависимость температуры на границе фазовых переходов от времени для значений проницаемости $k_0 = 2 \cdot 10^{-16}, 10^{-15}$ м². Значения остальных параметров такие же, как для рис. 2. Из рис. 3, а следует, что при малых значениях абсолютной проницаемости пористой среды температура на границе фазовых переходов (и соответственно в области, содержащей метан и воду) меньше равновесной температуры пласта. Это обусловлено низкой интенсивностью процесса образования гидрата SO₂, которая лимитируется скоростью подвода диоксида серы к поверхности фазового перехода и согласно закону Дарси зависит от проницаемости пласта. При этом имеют место, во-первых, низкая интенсивность выделения тепла при образовании газогидрата на границе фазовых переходов, во-вторых, малая удаленность поверхности, на которой происходит гидратообразование, от холодной левой границы пласта и, следовательно, относительно высокая скорость отвода тепла от этой поверхности через левую границу пласта. Таким образом, при малых значениях проницаемости пласта процесс инъекции при данных параметрах в любой момент времени сопровождается образованием газогидрата метана.

Увеличение проницаемости пласта приводит к увеличению интенсивности фазовых переходов и как следствие температуры на фронте образования газогидрата (см. рис. 3, б).

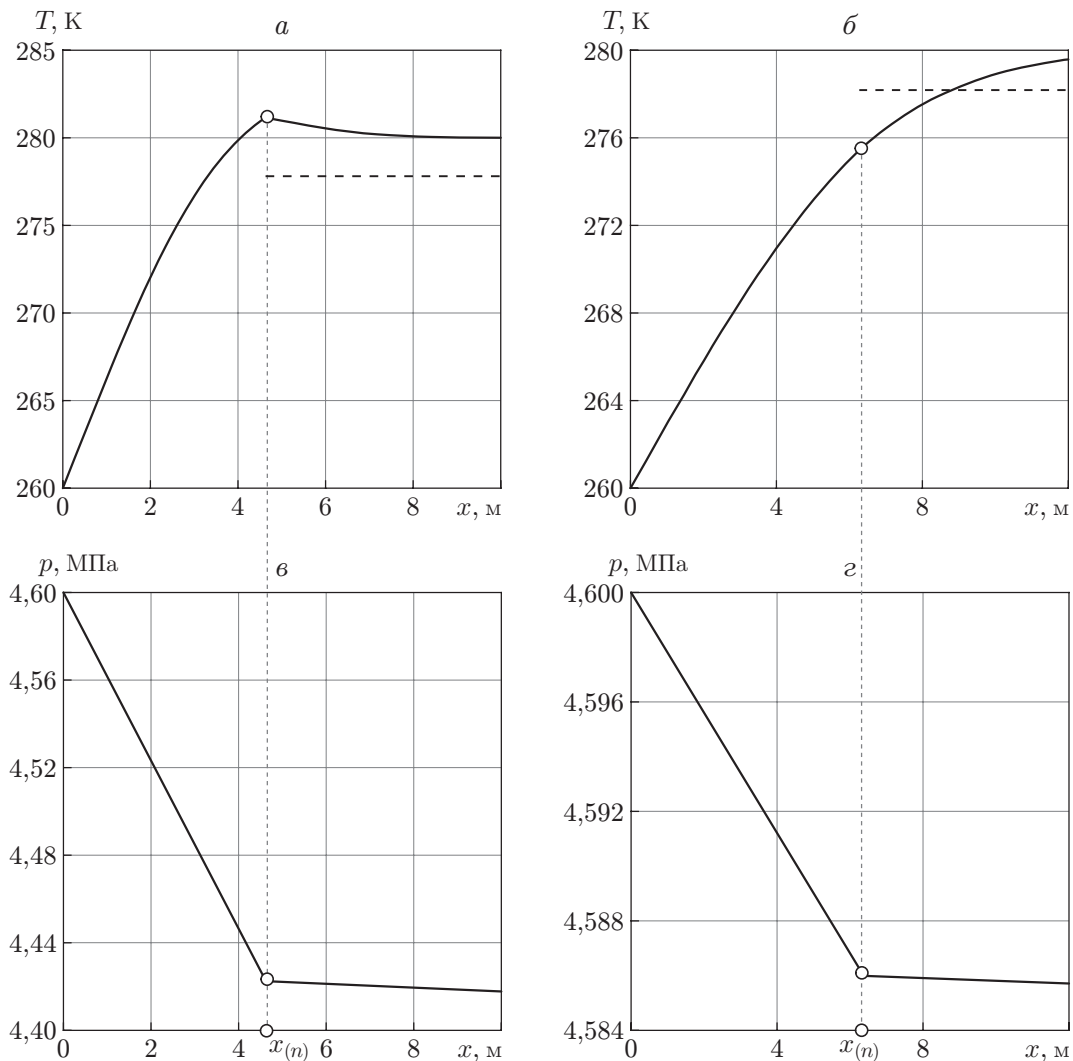


Рис. 2. Распределения температуры (*а*, *б*) и давления (*в*, *г*) в пласте при различных значениях времени:
а, *в* — $t = 40$ сут, *б*, *г* — $t = 200$ сут; штриховая линия — определяемая из уравнения (9) равновесная температура, при которой образуется газогидрат метана

Поэтому в отличие от случая, показанного на рис. 3, *а*, на начальном этапе образования газогидрата метана не происходит. Однако с течением времени температура на поверхности между областями начинает уменьшаться вследствие уменьшения интенсивности фазовых переходов и скорости движения этой поверхности. Данная скорость определяется, прежде всего, скоростью массопереноса в пласте, а значит, величиной перепада давления в пласте. Это обусловлено тем, что вследствие непроницаемости внешней границы пласта с течением времени значения давления во всех точках пласта приближаются к значению давления, при котором происходит инжекция, что соответствует уменьшению перепада давления в пласте. Поэтому при достаточно больших значениях времени с момента начала инжекции температура на границе, разделяющей области, становится меньше равновесной температуры, при которой образуется гидрат метана. В данный момент времени возникает дополнительная граница фазовых переходов, на которой происходит образование газогидрата метана и соответственно в пласте образуется дополнительная область, частично насыщенная газогидратом метана.

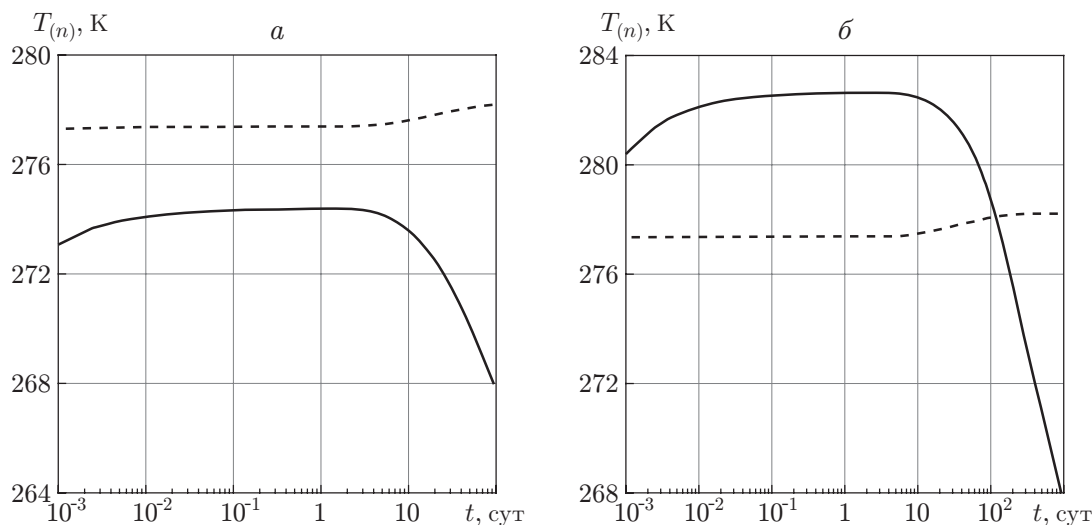


Рис. 3. Зависимость температуры на границе фазовых переходов от времени при различных значениях проницаемости:
 a — $k_0 = 2 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2$, b — $k_0 = 10^{-15} \text{ м}^2$; штриховая линия — равновесная температура, при которой образуется гидрат метана

На рис. 4 представлены зависимости температуры на границе фазовых переходов и ее координаты от времени для значений давления инъекции $p_e = 4,5; 5,0$ МПа. Значения остальных параметров такие же, как для рис. 2. Как следует из рис. 4, a, b , при малых значениях давления инъекции температура в области, насыщенной метаном и водой, в любой момент времени меньше равновесной температуры, при которой образуется гидрат метана. Следовательно, в данном случае в любой момент времени возникает дополнительная граница фазовых переходов, на которой происходит образование газогидрата метана.

При больших значениях давления инъекции (см. рис. 4, b, c) на начальном этапе температура в области, содержащей метан и воду, превышает равновесную температуру образования газогидрата метана. Следовательно, при данных значениях давления инъекции на начальном этапе процесс происходит без образования газогидрата метана. Однако с течением времени температура пласта на границе, разделяющей области, начинает уменьшаться и становится меньше равновесной температуры образования газогидрата метана. Таким образом, при больших значениях времени с момента начала инъекции в пласте возникает дополнительная область, частично насыщенная газогидратом метана.

На рис. 5 для момента времени $t = 140$ сут представлена зависимость температуры на границе фазовых переходов от начального давления системы. Видно, что с увеличением значения p_0 температура границы фазового перехода уменьшается. Это обусловлено тем, что скорость поверхности гидратообразования и соответственно температура на ней лимитируются скоростью массопереноса в пласте, согласно закону Дарси зависящей от величины перепада давления. Поскольку при увеличении начального давления в пласте и постоянном давлении инъекции величина перепада давления в пласте уменьшается, скорость поверхности гидратообразования также уменьшается.

Таким образом, на начальном этапе в зависимости от абсолютной проницаемости пористой среды и давления инъекции процесс вытеснения метана из пласта может либо сопровождаться образованием газогидрата метана, либо происходить без его образования (см. рис. 2–4). При этом для каждого значения проницаемости существует предельное (критическое) значение давления инъекции, при превышении которого вытеснение метана диоксидом серы происходит без образования газогидрата метана.

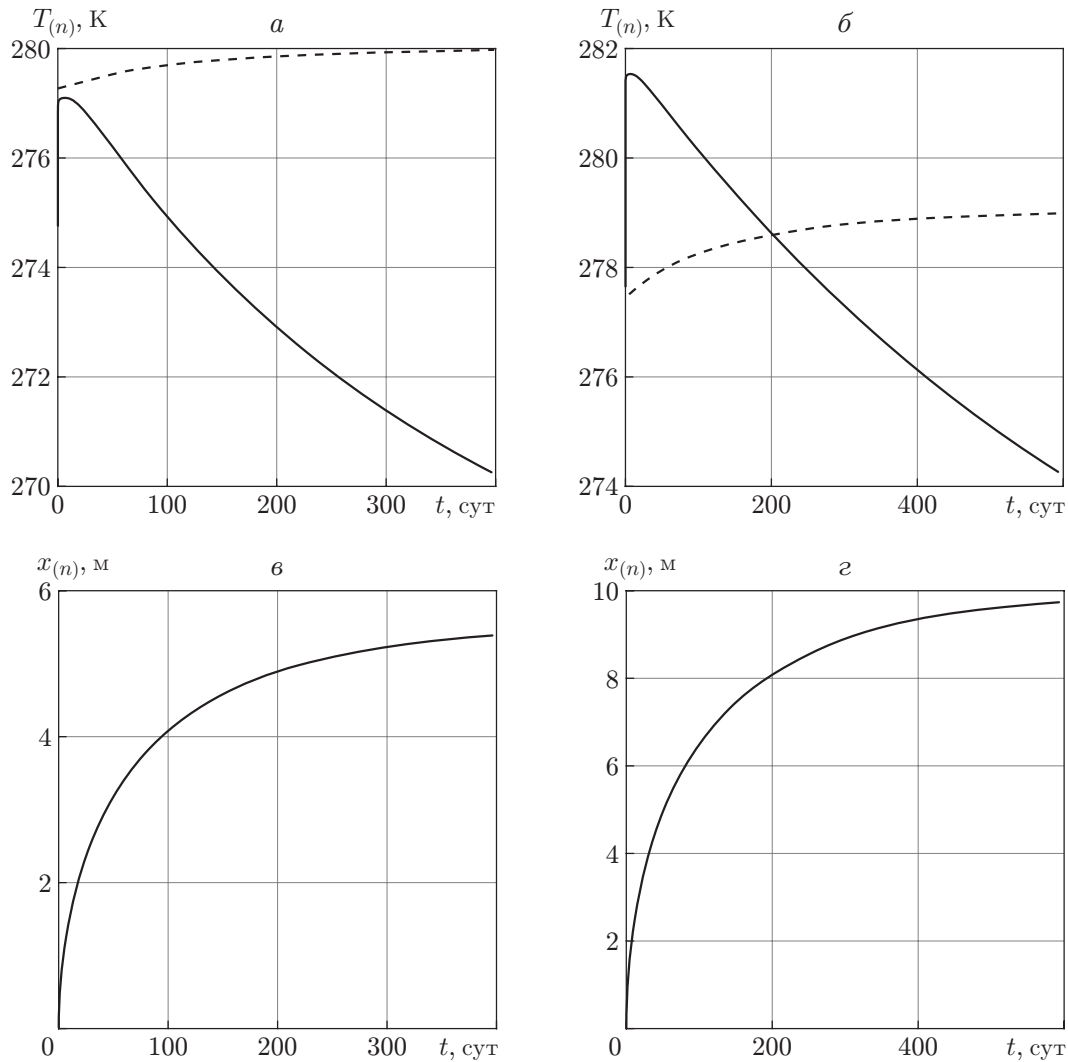


Рис. 4. Зависимости температуры на границе фазовых переходов (*а*, *б*) и ее координаты (*в*, *г*) от времени при различных значениях давления инъекции: *а*, *в* — $p_e = 4,5$ МПа, *б*, *г* — $p_e = 5$ МПа; штриховая линия — равновесная температура, при которой образуется гидрат метана

На рис. 6 для значения времени $t = 5$ сут приведены зависимости критического значения давления инъекции от абсолютной проницаемости пористой среды при различных значениях начального давления пласта. Видно, что с увеличением проницаемости и уменьшением начального давления пласта критическое значение давления уменьшается. Это обусловлено тем, что образование газогидрата метана возможно только при достаточно малых значениях скорости движения поверхности вытеснения метана диоксидом серы. При этом для поддержания данной скорости движения указанной поверхности при увеличении проницаемости пористой среды и уменьшении начального давления требуется уменьшить давление, при котором происходит инъекция.

Заключение. Результаты анализа полученных численных решений показывают, что при закачивании жидкого диоксида серы в коллектор, насыщенный метаном и водой, в зависимости от времени с момента начала инъекции образование газогидрата SO_2 может либо сопровождаться образованием газогидрата метана, либо происходить без его образования. При этом режим с образованием газогидрата метана реализуется либо при доста-

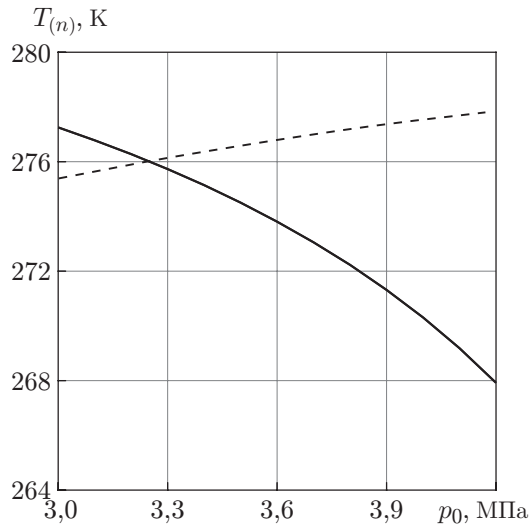


Рис. 5

Рис. 5. Зависимость температуры на границе фазовых переходов от начального давления системы при $t = 140$ сут:

штриховая линия — равновесная температура, при которой образуется гидрат метана

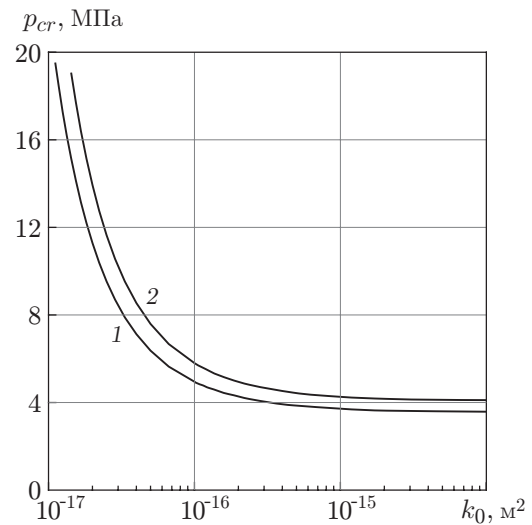


Рис. 6

Рис. 6. Зависимость критического давления инъекции от проницаемости пласта при $t = 5$ сут и различных значениях начального давления:

1 — $p_0 = 3,5$ МПа, 2 — $p_0 = 4$ МПа

точно больших значениях времени инъекции, либо при малых значениях проницаемости и давления инъекции, а также при больших значениях начального давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Qi Li, Xiaochun Li, Ning Wei, Zhiming Fang.** Possibilities and potentials of geological co-storage CO₂ and SO₂ in China // *Energy Procedia*. 2011. V. 4. P. 6015–6020.
2. **Anshits A., Kirik N., Shibistov B.** Possibilities of SO₂ storage in geological strata of permafrost terrain // *Adv. Geol. Storage Carbon Dioxide*. 2006. V. 65. P. 93–102.
3. **Аншиц А. Г., Кирик Н. П., Верецагин С. Н.** Экологическая и инженерная геология: подземное захоронение как возможность полной утилизации сернистых газов // *Инж. экология*. 2009. № 3. С. 3–19.
4. **Истомин В. А.** Газовые гидраты в природных условиях / В. А. Истомин, В. С. Якушев. М.: Недра, 1992.
5. **Chuvilin E. M., Guryeva O. M.** The role of hydrate formation processes in industrial CO₂ sequestration in permafrost area // *Petroleum Abstr.* 2015. V. 55, N 48. P. 96.
6. **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), 6–8 July 2008*. Vancouver: Univ. British Columbia Library, 2008.
7. **Chuvilin E. M., Guryeva O. M.** The role of hydrate formation processes in industrial CO₂ sequestration in permafrost area // *Proc. of the 7th Intern. conf. on gas hydrates, Edinburgh (Great Britain), 17–21 July 2011*. Red Hook: Curran Associates, 2011. P. 220.
8. **Chuvilin E. M., Guryeva O. M.** Carbon dioxide gas hydrates accumulation in freezing and frozen sediments // *Proc. of the 6th Intern. conf. on gas hydrates, Vancouver (Canada), 6–8 July 2008*. Vancouver: Univ. British Columbia Library, 2008. P. 5469.

9. **Jadhawar P., Mohammadi A. H., Yang J., Tohidi B.** Subsurface carbon dioxide storage through clathrate hydrate formation // *Adv. Geol. Storage Carbon Dioxide*. 2006. V. 65. P. 111–126.
10. **Дучков А. Д., Соколова Л. С., Аюнов Д. Е., Пермьяков М. Е.** Оценка возможности захоронения углекислого газа в криолитозоне Западной Сибири // *Криосфера Земли*. 2009. Т. 13, № 4. С. 62–68.
11. **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.
12. **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.
13. **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.
14. **Chernov A. A., Pil'nik A. A., Elistratov D. S., et al.** New hydrate formation methods in a liquid-gas medium // *Sci. Rep.* 2017. N 7. P. 408–409.
15. **Цыпкин Г. Г.** Образование гидрата при инъекции жидкой двуокиси углерода в пласт, насыщенный метаном и водой // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. 2016. № 5. С. 99–107.
16. **Хасанов М. К.** Режимы гидратообразования при инъекции углекислого газа в пористую среду, насыщенную метаном и водой // *Инж.-физ. журн.* 2018. Т. 91, № 4. С. 922–931.
17. **Хасанов М. К.** Образование области смеси гидратов диоксида углерода и метана при инъекции жидкого диоксида углерода в пласт, насыщенный метаном и водой // *Прикл. математика и механика*. 2018. Вып. 6. С. 789–793.
18. **Хасанов М. К.** Инъекция углекислого газа в пласт, насыщенный метаном и водой // *ПМТФ*. 2017. Т. 58, № 4. С. 95–107.
19. **Самарский А. А.** Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. М.: Едиториал УРСС, 2003.

*Поступила в редакцию 16/ХІІ 2019 г.,
после доработки — 16/ХІІ 2019 г.
Принята к публикации 2/ІІІ 2020 г.*
