

УДК 622.279.72

Исследование режимов замещения метана в газогидрате на диоксид углерода при инъекции жидкой двуокиси углерода в пористый пласт*

М.К. Хасанов¹, М.В. Столповский^{1,2}, И.К. Гималтдинов²

¹Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета

²Уфимский государственный нефтяной технический университет

E-mail: s_maxim.pmm@mail.ru

На основе построенной математической модели исследованы режимы замещения метана в газогидрате на диоксид углерода при инъекции жидкой двуокиси углерода в пористый пласт конечной протяженности. Установлено, что в зависимости от параметров инжектируемой двуокиси углерода, а также условий на границах пласта процесс образования гидрата углекислого газа может происходить как с замещением метана в газогидрате на диоксид углерода, так и с образованием области, содержащей метан и воду в свободном состоянии. Построены критические диаграммы, определяющие условия реализации каждого из этих режимов.

Ключевые слова: фильтрация, газовый гидрат, замещение.

Введение

Природные газовые гидраты представляют собой кристаллические соединения газа (чаще всего метана) и воды, образующиеся при определенных термобарических условиях. Огромные запасы природного газа, сосредоточенные в гидратах (от $2 \cdot 10^{14}$ до $7,6 \cdot 10^{18}$ м³ [1]), делают их практически неисчерпаемым источником энергии, топливом будущего. Другой аспект их изучения связан с секвестрацией парниковых газов (в частности, и углекислого газа) путем их перевода в газогидратное состояние. Рядом исследователей предлагалась идея инъекции CO₂ в природные газогидратные залежи с целью извлечения из них природного газа и связывания диоксида углерода в газогидратной форме [2]. Такой подход обусловлен тем, что гидрат диоксида углерода при прочих равных условиях термодинамически более стабилен, чем гидрат метана [3].

Результаты экспериментальных исследований по замещению метана в газогидрате на диоксид углерода представлены, в частности, в работах [4–12]. Следует отметить, что в этих и других аналогичных экспериментальных работах исследования процессов замещения проводились в образцах небольшого размера, поэтому вследствие малых размеров образцов процессы замещения метана в газогидрате на диоксид углерода лимитируются кинетическими механизмами.

Математические модели замещения метана в газогидрате на диоксид углерода при инъекции диоксида углерода в газогидратный пласт рассматривались в работах [13–18].

* Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 17-79-20001).

Однако в данных работах представлены аналитические решения задачи в автомоделном приближении, описывающие распределение давления и температуры в пласте. Для получения этих решений использовалась линеаризация Лейбензона и допущение о полубесконечной протяженности пласта, вследствие чего можно утверждать, что указанные решения позволяют адекватно описывать процесс только при небольших перепадах давления и температуры в пласте, а с учетом конечной протяженности реального пласта эти решения справедливы лишь на начальном временном этапе протекания процесса (т.е. пока возмущение давления не достигнет правой границы пласта). В настоящей работе численно исследуется инжекция жидкой двуокиси углерода в пласт конечной протяженности, изначально насыщенный метаном и его гидратом. Такая постановка, в отличие от [13–18], позволяет исследовать влияние параметров, соответствующих правой границе пласта, на особенности протекания процесса замещения в газогидратном пласте.

Постановка задачи и основные уравнения

Рассмотрим пористый пласт длиной L , кровля и подошва которого непроницаемы и теплоизолированы. Будем полагать, что пласт изначально насыщен метаном и его гидратом с исходной гидратонасыщенностью v , давление p_0 и температура T_0 которых соответствует условиям их стабильного существования. Пусть через левую границу ($x = 0$) закачивается жидкая двуокись углерода, давление p_e и температура T_e которой соответствуют условиям существования жидкого диоксида углерода и его газогидрата. В результате инжекции образуются две области: ближняя, содержащая жидкую двуокись и гидрат CO_2 , и дальняя, в порах которой находится метан и его гидрат. При этом образуется граница $x = x_{(n)}$ между областями, движущаяся вглубь пласта, на которой происходит процесс замещения и вытеснения метана жидким диоксидом углерода. Данную границу будем считать устойчивой благодаря ламинарному характеру течений в пористой среде, а также вследствие того, что вязкость жидкого диоксида углерода превышает вязкость метана.

На рис. 1 представлены фазовые диаграммы условий существования газогидратов (диоксида углерода и метана) [19]. Здесь кривые 2 и 3 определяют соответственно трехфазные равновесия систем « CH_4 –вода–гидрат CH_4 » и « CO_2 –вода–гидрат CO_2 ». Области стабильного существования обоих газогидратов расположены выше соответствующих кривых 2 и 3. Кривая 1 соответствует двухфазному равновесию «жидкость–пар» для CO_2 . Таким образом, согласно постановке задачи, начальные значения давления и температуры пласта (p_0, T_0) лежат выше кривой 2, а параметры (p_e, T_e) нагнетаемой жидкой двуокиси углерода — выше кривой 1.

Условие трехфазного равновесия для системы «газ–вода–гидрат» может быть представлено в виде [19]

$$\ln p = A - B/T, \quad (1)$$

где p — давление (в МПа), T — температура, A и B — постоянные для соответствующего газа-гидратообразователя. В частности, для метана $A = 29,112$, $B = 7694,3$.

При описании процессов тепломассопереноса используем следующие допущения: скелет пористой среды и гидрат несжимаемы и неподвижны,

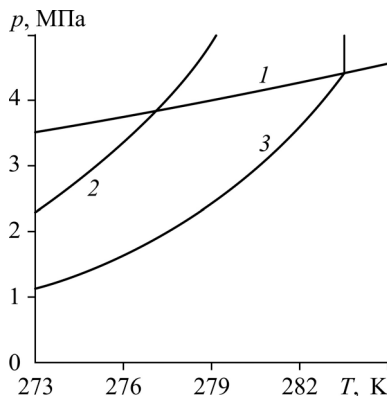


Рис. 1. Фазовые диаграммы систем « CO_2 – H_2O –гидрат CO_2 » и « CH_4 – H_2O –гидрат CH_4 ».

1 — двухфазное равновесие системы «жидкость–пар»,
2, 3 — трехфазные равновесия систем « CH_4 – H_2O –гидрат CH_4 » и « CO_2 – H_2O –гидрат CO_2 » соответственно.

пористость постоянна, температура пористой среды и насыщающего ее вещества совпадают, газ (метан) считается калорически совершенным, а жидкость (двуокись углерода) — упругой жидкостью. Система основных уравнений в плоскоодномерном приближении, представляющая собой уравнения сохранения массы и энергии, закон Дарси, уравнение состояния калорически совершенного газа и упругой жидкости, при отмеченных допущениях имеет вид [13–18, 20]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \varphi S_i) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_i \varphi S_i v_i) &= 0, \\ \rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_i C_i \varphi S_i v_i \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right), \\ \varphi S_i v_i &= -\frac{k_i}{\mu_i} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}, \quad \rho_m = p / (R_m T), \\ \rho_c &= \rho_{c0} \exp(\beta(p - p_0)), \end{aligned} \quad (2)$$

здесь φ — пористость, t — время; S_i , ρ_i , C_i , v_i , μ_i , k_i ($i = c, m$) — соответственно насыщенность, плотность, удельная теплоемкость, скорость, динамическая вязкость и проницаемость i -ой фазы (c — жидкая двуокись углерода, m — метан), R_m — приведенная газовая постоянная для метана, ρ_{c0} и β — истинная плотность двуокиси углерода при давлении p_0 и коэффициент объемного сжатия жидкой двуокиси углерода, ρC и λ — удельная объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности системы «пласт-насыщающее вещество».

Зависимость коэффициента проницаемости k_i от насыщенности S_i и абсолютной проницаемости k_0 зададим следующим образом [21]:

$$k_i = k_0 S_i^3.$$

Условия баланса массы диоксида углерода и метана на границе вытеснения метана диоксидом углерода с учетом замещения CH_4 на CO_2 в составе газогидрата запишем как [13–18]

$$\begin{aligned} \varphi \rho_c S_c (v_c - \dot{x}_{(n)}) &= \varphi \rho_{hc} S_{hc} G_c \dot{x}_{(n)}, \\ \varphi \rho_m S_m (v_m - \dot{x}_{(n)}) &= \varphi \rho_{hm} S_{hm} G_m \dot{x}_{(n)}, \end{aligned}$$

где ρ_{hi} , S_{hi} — плотность и насыщенность пор для газогидрата диоксида углерода ($i = c$) и газогидрата метана ($i = m$), G_i — массовое содержание газа-гидратообразователя в составе гидрата, $\dot{x}_{(n)}$ — скорость движения границы, на которой происходит замещение. Нижний индекс n относится к параметрам на границе замещения.

С учетом последней системы уравнений и закона Дарси, условия баланса массы и тепла на границе между первой и второй областями можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} -\frac{k_c}{\mu_c} \cdot \frac{\partial p_{(1)}}{\partial x} &= \varphi \left(\frac{\rho_{hc}}{\rho_c} S_{hc} G_c + S_c \right) \dot{x}_{(n)}, \\ -\frac{k_m}{\mu_m} \cdot \frac{\partial p_{(2)}}{\partial x} &= \varphi \left(\frac{\rho_{hm}}{\rho_m} S_{hm} G_m + S_m \right) \dot{x}_{(n)}, \\ \lambda \frac{\partial T_{(1)}}{\partial x} - \lambda \frac{\partial T_{(2)}}{\partial x} &= \varphi (\rho_{hc} L_{hc} S_{hc} - \rho_{hm} L_{hm} S_{hm}) \dot{x}_{(n)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где L_{hi} — удельная теплота образования газогидрата ($i = c, m$); p_j и T_j — давление и температура j -ой области ($j = 1, 2$). Здесь и далее нижние индексы в скобках $j = 1, 2$ относятся соответственно к параметрам первой и второй областей.

Условие баланса массы воды, содержащейся в составе газогидратов CO_2 и CH_4 , можно представить в виде:

$$\phi S_{hc} \rho_{hc} (1 - G_c) \dot{x}_{(n)} = \phi S_{hm} \rho_{hm} (1 - G_m) \dot{x}_{(n)}.$$

Поскольку исходная объемная насыщенность пор гидратом метана равна S_{hm0} , то для величины объемной насыщенности гидратом CO_2 получим

$$S_{hc} = \frac{\rho_{hm} (1 - G_m)}{\rho_{hc} (1 - G_c)} S_{hm0}.$$

Начальные условия, а также условия на границах пласта представим в виде:

$$\begin{aligned} t = 0: \quad p &= p_0, \quad T = T_0 \quad (0 \leq x \leq L); \\ x = 0: \quad p &= p_e, \quad T = T_e \quad (t > 0); \\ x = L: \quad p &= p_0, \quad \partial T / \partial x = 0 \quad (t > 0). \end{aligned} \quad (4)$$

Применив к первому уравнению системы (2) закон Дарси, а также уравнения состояния калорически совершенного газа и слабосжимаемой жидкости, получим уравнения пьезопроводности, описывающие распределения давления в ближней ($j = 1$) и дальней ($j = 2$) областях:

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} = \frac{k_1}{m S_c \mu_c \beta \exp(\beta(p_1 - p_0))} \frac{\partial}{\partial x} \left(\exp(\beta(p_1 - p_0)) \frac{\partial p_1}{\partial x} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial t} = \frac{k_2}{m S_m \mu_m} \frac{\partial}{\partial x} \left(p_2 \frac{\partial p_2}{\partial x} \right). \quad (6)$$

Отметим, что выражение (5) получено в предположении, что изменения температуры ΔT в области фильтрации метана являются небольшими, т.е. $\Delta T \ll T$.

Аналогично, уравнение энергии (второе уравнение системы (2)) можно представить в виде

$$\frac{\partial T_j}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa^{(T)} \frac{\partial T_j}{\partial x} \right) + \frac{\rho_i C_i}{\rho C} \frac{k_j}{\mu_i} \frac{\partial p_j}{\partial x} \frac{\partial T_j}{\partial x}, \quad (i = c, m), \quad (7)$$

где $\kappa^{(T)} = \lambda / \rho C$ — коэффициент температуропроводности пласта.

Полученная система уравнений (5)–(7) с начальными и граничными условиями (4), а также условиями (3) на подвижной границе фазовых переходов является замкнутой. Для ее решения используется метод ловли фронта в узел пространственной сетки [22]. При этом исходные уравнения представляются в неявном конечно-разностном виде. Данная система алгебраических уравнений решалась методом прогонки в сочетании с методом итераций.

Результаты расчетов

На рис. 2 для момента времени $t = 20$ сут. представлены распределения давления и температуры в пласте при нагнетании жидкого диоксида углерода с температурой $T_e = 280$ К (рис. 2а) и $T_e = 282$ К (рис. 2б) в пористый пласт протяженности $L = 100$ м. Для других параметров приняты значения: $\phi = 0,2$, $S_{hm0} = 0,2$, $k_0 = 3 \cdot 10^{-16}$ м², $p_0 = 3,2$ МПа, $p_e = 3,8$ МПа, $T_0 = 274$ К, $\rho C = 2,5 \cdot 10^6$ Дж/(К·м³), $\lambda = 2$ Вт/(м·К), $G_c = 0,28$, $G_m = 0,13$,

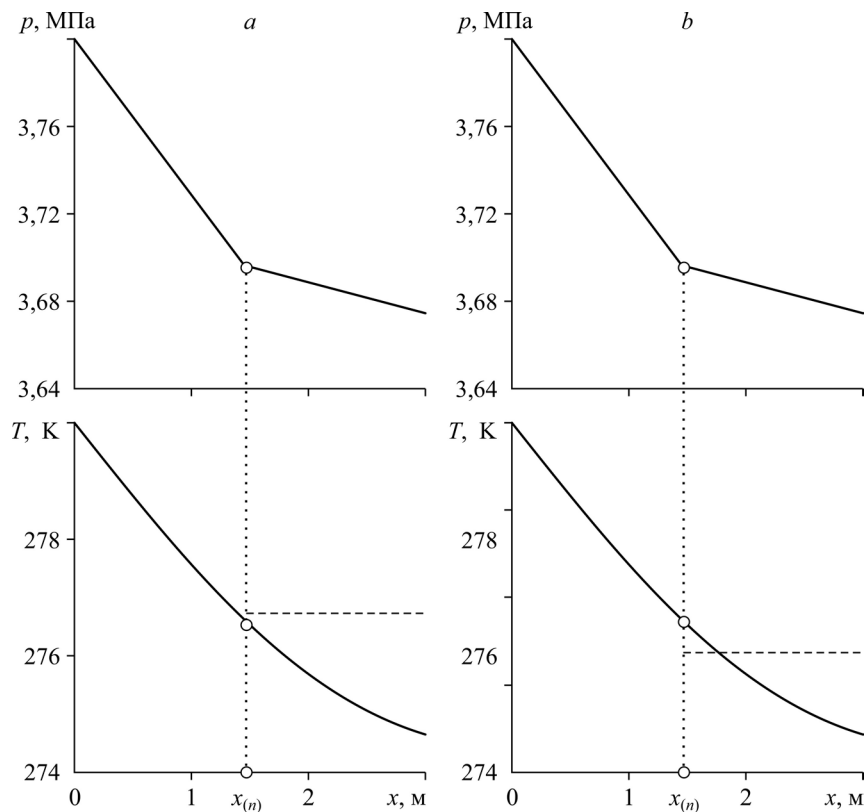


Рис. 2. Распределения давления и температуры пласта при $T_e = 280$ (a), 282 (b) К.

$R_m = 520$ Дж/(кг·К), $\rho_{hc} = 1100$ кг/м³, $\rho_{hm} = 900$ кг/м³, $\rho_{c0} = 890$ кг/м³, $\beta = 10^{-8}$ Па⁻¹, $\mu_c = 10^{-4}$ Па·с, $\mu_m = 10^{-5}$ Па·с, $L_{hc} = 3,54 \cdot 10^5$ Дж/кг, $L_{hm} = 4,5 \cdot 10^5$ Дж/кг, $C_c = 2600$ Дж/(кг·К), $C_m = 1560$ Дж/(кг·К). Из рис. 2a видно, что при относительно невысокой температуре нагнетаемой двуокиси углерода температура пласта в области метана и его гидрата (сплошная линия) лежит ниже равновесной температуры разложения газогидрата метана (штриховая линия), вычисленной из соотношения (1). В этом случае решения с фронтальной границей замещения являются термодинамически непротиворечивыми. Увеличение температуры нагнетаемого CO₂ (рис. 2b) ведет к тому, что температура на некотором участке области, содержащей метан и его гидрат, поднимается выше равновесной температуры разложения газогидрата метана, т.е. наблюдается «перегрев» гидрата метана. Таким образом, при увеличении температуры инжектируемой двуокиси углерода модель с замещением гидрата метана гидратом CO₂ на фронтальной границе не позволяет построить термодинамически непротиворечивые решения. Для устранения термодинамического противоречия необходимо в рассматриваемую модель ввести область, содержащую продукты разложения газогидрата метана (метан и воду).

На рис. 3 представлена зависимость температуры T_m на границе фазового перехода от давления нагнетаемой двуокиси углерода (рис. 3a) и проницаемости пласта (рис. 3b) для момента времени $t = 20$ сут. Штриховая линия на графиках соответствует равновесной температуре диссоциации гидрата метана. Из рисунка следует, что с увеличением как давления нагнетаемой жидкости, так и проницаемости пласта, температура на границе фазового перехода уменьшается. Это можно объяснить следующим. Интенсивность замещения определяется скоростью поступления CO₂ к границе фазового перехода, поэтому при увеличении давления p_e и проницаемости k_0 граница фазового перехода будет все дальше отстоять от левой границы пласта $x = 0$. Следовательно, с увеличением

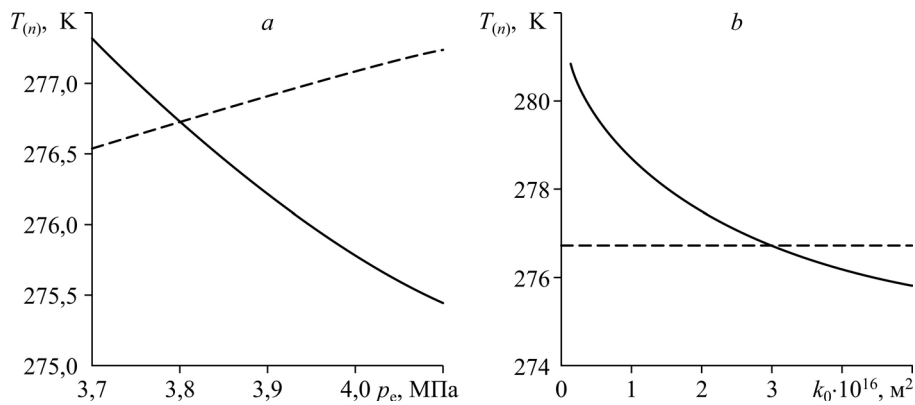


Рис. 3. Зависимости температуры на границе фазового перехода от давления инъекции (а) и проницаемости пласта (b).

давления инъекции и проницаемости пласта влияние температуры закачиваемого диоксида углерода на температуру фронта замещения будет ослабевать. Таким образом, при невысоких значениях p_e и k_0 влияние температуры левой границы пласта на температуру второй области становится существенным, что может привести к «перегреву» газогидрата метана. В этом случае процесс инъекции жидкого диоксида углерода будет сопровождаться разложением газогидрата CH_4 на метан и воду и образованием газогидрата CO_2 из жидкого диоксида углерода и выделившейся воды.

На рис. 4 для момента времени $t = 20$ сут. представлены зависимости температуры на границе фазового перехода от давления на правой границе пласта (рис. 4а) и от исходной температуры системы (рис. 4б). Как следует из рис. 4а, с увеличением давления на правой границе температура на границе фазового перехода возрастает. Это объясняется тем, что при неизменном значении давления инъекции p_e с ростом значения p_0 уменьшается градиент давления в пласте. При этом уменьшается и интенсивность фазового перехода, поскольку, в соответствии с законом Дарси, уменьшается скорость подвода CO_2 к данной границе. Следовательно, в этом случае существенным является влияние левой границы пласта на температуру второй области.

Из рис. 4б следует, что с ростом исходной температуры пласта температура границы фазового перехода также растет. При этом с ростом T_0 координата границы фазового перехода не изменяется и равновесная температура разложения газогидрата метана (штриховая линия) остается постоянной. Рост температуры пласта на данной границе обусловлен лишь изменением исходной температуры системы. Таким образом, режим с замещением CH_4 в газогидрате на CO_2 реализуется при низких значениях давления на правой границе пласта и исходной температуры системы.

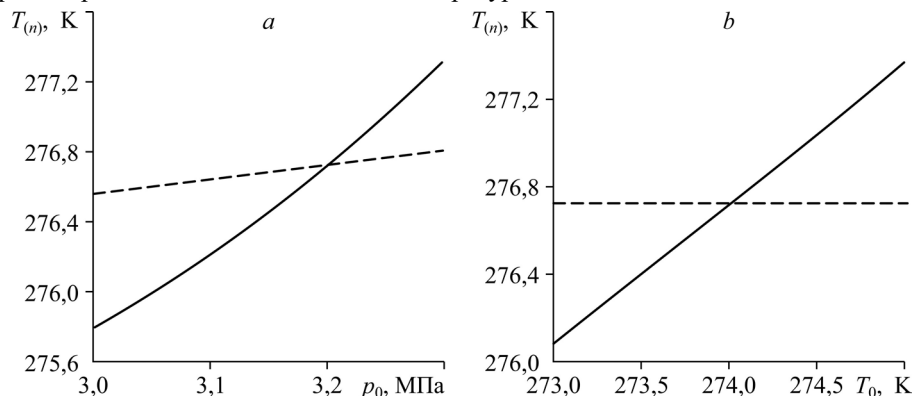


Рис. 4. Зависимости температуры на границе фазового перехода от давления на правой границе пласта $x = L$ (а) и исходной температуры (b).

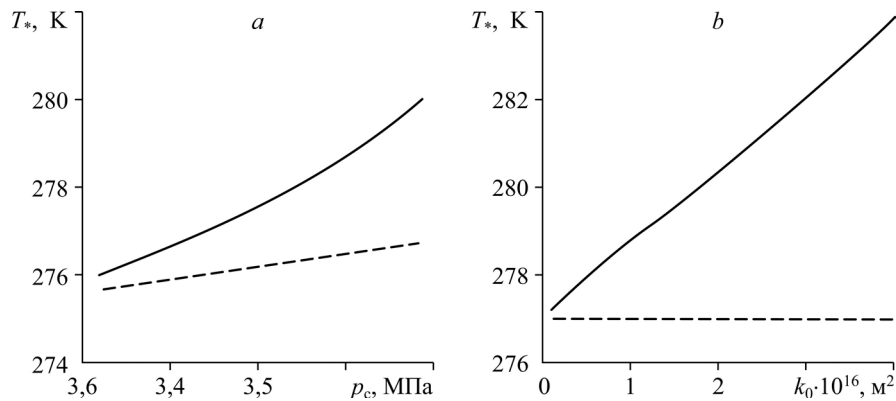


Рис. 5. Зависимости предельной температуры инжекции от давления инжекции (а) и проницаемости пласта (б).

На рис. 5 представлены зависимости от давления инжекции и проницаемости пласта предельной температуры закачиваемого жидкого диоксида углерода T_* , при превышении которой реализуется режим с образованием области, содержащей метан и воду. Из рисунка следует, что при увеличении давления инжекции и проницаемости пласта значение предельной температуры растет. Это обусловлено тем, что как было отмечено выше, с увеличением p_e и k_0 влияние более теплой левой границы на температуру второй области уменьшается. Следовательно, чтобы влияние левой границы было существенным, т.е. реализовывался режим с образованием области, насыщенной метаном и водой, необходимо увеличивать температуру закачиваемого жидкого диоксида углерода.

На рис. 6 представлена зависимость предельной температуры закачиваемого жидкого диоксида углерода, при превышении которой реализуется режим с образованием области, содержащей метан и воду, от величины давления на правой границе пласта и исходной температуры системы. Как следует из рис. 6а, при увеличении значений p_0 величина предельной температуры уменьшается. Это объясняется тем, что с увеличением p_0 влияние более теплой левой границы на температуру второй области оказывается все более существенным. Таким образом, при более низких значениях температуры закачиваемого жидкого диоксида углерода возможен режим с образованием области, содержащей метан и воду.

Аналогично, как следует из рис. 6б, величина предельной температуры инжекции с ростом T_0 уменьшается. Это связано с тем, что с ростом T_0 увеличивается температура всей системы, в том числе и температура на границе фазового перехода. Следовательно, в этом случае возможно образование области, содержащей метан и воду, при более низкой температуре инжектируемой двуокиси углерода.

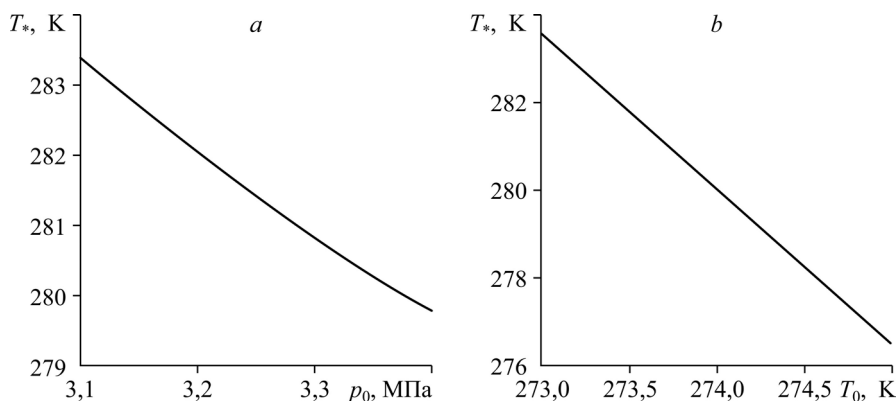


Рис. 6. Зависимости предельной температуры инжекции от давления на правой границе пласта $x = L$ (а) и исходной температуры (б).

Список обозначений

x — пространственная координата, м,	L_h — удельная теплота гидратообразования, Дж/кг,
L — длина пласта, м,	λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К),
p — давление, МПа,	C — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К),
T — температура, К,	ρC — удельная объемная теплоемкость, Дж/(К·м ³),
t — время, с,	$\kappa^{(T)}$ — коэффициент температуропроводности, м ² /с,
k — коэффициент проницаемости, м ² ,	φ — пористость,
ρ — плотность, кг/м ³ ,	S — насыщенность,
v — скорость, м/с,	G — массовая доля газа-гидратообразователя в составе гидрата,
μ — динамическая вязкость, Па·с,	S_{hm0} — исходная объемная насыщенность пор гидратом метана
β — коэффициент объемного сжатия, Па ⁻¹ ,	
R — приведенная газовая постоянная, Дж/(кг·К),	

Индексы

e — внешний,	0 — начальное состояние,
g — газовая фаза,	m — метан,
h — газогидрат,	c — жидкая двуокись углерода.
n — граница между первой и второй областями,	

Список литературы

1. Соловьев В.А. Природные газовые гидраты как потенциальное полезное ископаемое // Российский химический журнал. 2003. Т. 47, № 3. С. 59–69.
2. Ohgaki K., Takano K., Sangawa H., Matsubara T., Nakano S. Methane exploitation by carbon dioxide from gas hydrates—phase equilibria for CO₂-CH₄ mixed hydrate systems // J. Chemical Engng of Japan. 1996. Vol. 29. P. 478–483.
3. Kvamme B., Tanaka H. Thermodynamic stability of hydrates for ethane, ethylene and carbon dioxide // J. Physical Chemistry. 1995. Vol. 99, No. 18. P. 7114–7119.
4. Hirohama S., Shimoyama Y., Wakabayashi A., Tatsuta S., Nishida N. Conversion of CH₄-hydrate to CO₂-hydrate in liquid CO₂ // J. Chemical Engng of Japan. 1996. Vol. 29, No. 6. P. 1014–1020.
5. Lee H., Seo Y., Seo Y.T., Moudrakovski I.L., Ripmeester J.A. Recovering methane from solid methane hydrate with carbon dioxide // Angewandte Chemie. 2003. Vol. 42, No. 41. P. 5048–5051.
6. Ota M., Morohashi K., Abe Y., Watanabe M., Smith R.L., Inomata H. Replacement of CH₄ in the hydrate by use of liquid CO₂ // Energy Conversion and Management. 2005. Vol. 46. P. 1680–1691.
7. Ota M., Abe Y., Watanabe M., Smith R.L., Inomata H. Methane recovery from methane hydrate using pressurized CO₂ // Fluid Phase Equilibria. 2005. Vol. 228–229. P. 553–559.
8. Yuan Q., Sun C.-Y., Liu B., Wang X., Ma Z.W. Methane recovery from natural gas hydrate in porous sediment using pressurized liquid CO₂ // Energy Conversion and Management. 2013. Vol. 67. P. 257–264.
9. Zhou X.T., Fan S.S., Liang D.Q., Du J. Replacement of methane from quartz sand-bearing hydrate with carbon dioxide-in water emulsion // Energy Fuels. 2008. Vol. 22. P. 1759–1764.
10. Zhang Y., Xiong L., Li X. et al. Replacement of CH₄ in hydrate in porous sediments with liquid CO₂ injection // Chem. Eng. Technol. 2014. Vol. 37, No. 12. P. 2022–2029.
11. Jung J.W., Santamarina J.C. CH₄-CO₂ replacement in hydrate-bearing sediments: a pore-scale study // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2010. Vol. 11. P. Q0AA13, 8 p.
12. Espinoza D.N., Santamarina J.C. P-wave monitoring of hydrate-bearing sand during CH₄-CO₂ replacement // Inter. J. Greenhouse Gas Control. 2011. Vol. 5. P. 1031–1038.
13. Хасанов М.К., Шагапов В.Ш. Разложение газогидрата метана в пористой среде при инъекции теплого углекислого газа // Инж.-физ. журнал. 2016. Т. 89, № 5. С. 1129–1140.
14. Шагапов В.Ш., Хасанов М.К., Мусакаев Н.Г. Инъекция жидкого диоксида углерода в частично насыщенный гидратом метана пласт // Прикл. механика и техн. физика. 2016. Т. 57, № 6. С. 139–149.
15. Хасанов М.К. Инъекция вскипающей углекислоты в пласт, сопровождающаяся замещением метана в гидрате двуокисью углерода // Прикладная математика и механика. 2016. Т. 80, № 5. С. 553–565.
16. Шагапов В.Ш., Хасанов М.К. Режимы восстановления метана из газогидрата при инъекции «теплого» диоксида углерода в пористую среду // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55, № 5. С. 753–761.
17. Хасанов М.К. Математическая модель образования гидрата диоксида углерода при инъекции углекислого газа в метаногидратный пласт // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51, № 5. С. 499–509.
18. Shagapov V.Sh., Khasanov M.K., Musakaev N.G., Duong Ng.H. Theoretical research of the gas hydrate deposits development using the injection of carbon dioxide // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 107. P. 347–357.
19. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992. 236 с.
20. Шагапов В.Ш., Мусакаев Н.Г. Динамика образования и разложения гидратов в системах добычи, транспортировки и хранения газа. М.: Наука, 2016. 238 с.
21. Баренблатт Г.И., Енгов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. 211 с.
22. Самарский А.А., Вабишев П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2018 г.,
после доработки — 21 февраля 2019 г.,
принята к публикации 5 августа 2020 г.