

УДК 532.546:536.421

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБ ОБРАЗОВАНИИ ГИДРАТА ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА В ПОРИСТОМ ПЛАСТЕ, ИЗНАЧАЛЬНО НАСЫЩЕННОМ ГИДРАТОМ МЕТАНА

Гималтдинов Ильяс Кадинович¹,

iljas_g@mail.ru

Столповский Максим Владимирович¹,

s_maxim.pmm@mail.ru

Додова Маргарита Иссаевна¹,

dodova.m@yandex.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Актуальность работы обусловлена теоретическим исследованием процессов образования газовых гидратов в пористых средах применительно к проблемам добычи, транспортировки, консервации и хранения углеводородного сырья.

Цель исследования: на основе математической модели рассмотреть в осесимметричной постановке задачу о замещении гидрата метана, изначально содержащегося в пористом пласте, гидратом углекислого газа и выявить закономерности динамики образования газовых гидратов в пористой среде конечной протяженности при нагнетании газа через его левую границу, когда другая внешняя граница является открытой для потока газа.

Методы исследования: методы механики многофазных систем совместно с численными методами решения обобщенной задачи Стефана.

Результаты. Представлена математическая модель, и проведено численное исследование закачки диоксида углерода в пористый пласт, изначально насыщенный метаном и его гидратом, в осесимметричной постановке. Для решения поставленной задачи, заключающейся в нахождении распределения полей давления и температуры, а также в определении положения границы фазового перехода, был применен численный метод ловли фронтов в узел пространственной сетки. Установлено, что процесс замещения газогидрата сопровождается незначительным понижением давления и повышением температуры среды. Показано, что температура на границе фазового перехода зависит от давления закачиваемого газа. При высоких значениях давления нагнетаемого газа она стремится к своему предельному значению, зависящему от исходной гидратонасыщенности пласта. Исследованы зависимости времени полного вытеснения метана из пласта в зависимости от его проницаемости и давления нагнетаемого газа.

Ключевые слова:

Газогидраты, пористая среда, увеличение температуры, замещение газогидрата, задача Стефана, фазовые переходы, метод ловли фронта в узел пространственной сетки.

Введение

Изучение газовых гидратов на сегодняшний день представляет значительный научный и технический интерес, поскольку большая часть природного газа содержится в виде гидратной фазы. Существующие традиционные способы добычи газа из состава гидрата, такие как нагрев, разгерметизация пласта или закачка ингибитора [1], отличаются низкой энергоэффективностью [2] и могут приводить к геологическим опасностям во время добычи газа [3]. Поэтому для решения указанных проблем при добыче газа из состава гидрата предлагается использовать закачку в пористый пласт углекислого газа. Этот метод основан на замещении молекул метана, входящих в состав гидрата, молекулами углекислого газа.

Экспериментальные исследования замещения метана в газогидрате углекислым газом были проведены в работах [4–11]. Математические модели образования и разложения газогидратов в пористых средах при инъекции газа рассмотрены, например, в работах [12, 13]. Однако в данных работах закачивается тот же самый газ, который насыщает пласт в начальном состоянии. Математиче-

ская модель закачки углекислого газа в пористый пласт, насыщенный метаном и водой, представлена в работе [14]. В [15] исследуются особенности разложения газогидрата метана при инъекции теплового углекислого газа в пористую среду, насыщенную метаном и его газогидратом. Задача об инъекции вскипающей углекислоты была рассмотрена в [16].

В работах [17, 18] рассмотрены эксперименты, подтверждающие возможность замещения в газогидрате метана диоксида углерода при давлениях и температурах, соответствующих на фазовой диаграмме системы «метан–вода» зоне стабильного существования газогидрата метана. В настоящей работе на основе рассмотренных выше экспериментов представлена математическая модель инъекции углекислого газа в метаногидратный пласт конечной длины, при давлении и температуре, соответствующих стабильному устойчивому состоянию гидратов обоих газов. Принципиальная особенность математической модели такой задачи состоит в учете не только фазовых переходов, но и массопереноса в пористой среде. Необходимость учитывать фильтрационные процессы (движение

газа в пористой среде) усложняет задачу, поскольку, хотя она и сводится к задаче Стефана, но, в отличие от классической задачи Стефана, температура фазового перехода зависит от давления.

Известно, что большинство численных методов решения задач с фазовым переходом (задач Стефана) условно можно разделить на две группы: схемы сквозного счета и схемы с явным выделением фронта. Алгоритмы сквозного счета особенно широко применяются для многомерных задач, однако точность расчета, как значения температуры, так и положения границы раздела фаз, сильно зависит от параметра сглаживания, определить который часто довольно непросто. Поэтому в данной работе для решения задачи используется метод ловли фронта в узел пространственной сетки, рассмотрение которого представлено в работах [13, 19].

Постановка задачи

Условия существования газогидратов (диоксида углерода и метана) показаны на фазовой диаграмме (рис. 1) [20]. На данной диаграмме кривая 1 – кривая кипения CO_2 , а кривые 2 и 3 определяют равновесные условия диссоциации гидратов CH_4 и CO_2 , соответственно (области стабильного существования гидратов расположены выше этих кривых).

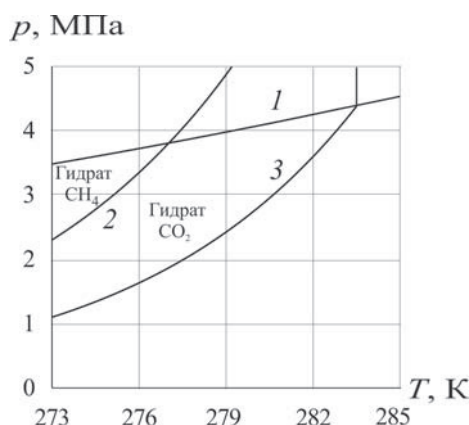


Рис. 1. Фазовые диаграммы систем « $\text{CO}_2\text{--H}_2\text{O}$ » и « $\text{CH}_4\text{--H}_2\text{O}$ »

Fig. 1. PT diagrams of $\text{CO}_2\text{--H}_2\text{O}$ and $\text{CH}_4\text{--H}_2\text{O}$ systems

Рассмотрим круговой пористый пласт с радиусом контура питания R_k , насыщенный в начальный момент времени газом (метаном) и его гидратом, давление p_0 и температура T_0 которых соответствуют условиям их стабильного существования, т. е. лежат выше кривой 2 (рис. 1). Будем полагать, что в центре пласта пробурена скважина радиуса r_w , вскрывшая его на всю толщину, через которую закачивается углекислый газ под давлением p_e и температурой T_e . Данные параметры соответствуют условиям стабильного существования углекислого газа и его гидрата (выше кривой 3), а также метана и воды (выше кривой 2). Положим, что в результате нагнетания диоксида углерода в пласте образуются две области. Так, в ближней, примыкающей к

скважине, области в порах присутствуют CO_2 и его гидрат, а в дальней, примыкающей к контуру питания, – CH_4 и его гидрат. При этом возникает подвижная граница фазовых переходов $r=r_{(n)}$, движущаяся вглубь пласта и разделяющая между собой две указанные области. Будем считать данную границу фазовых переходов устойчивой, поскольку вязкость углекислого газа выше вязкости метана и течения газов ламинарное.

При описании процессов тепло- и массопереноса, сопровождающихся фазовым переходом в пористой среде, примем следующие допущения: скелет пористой среды, гидраты метана и углекислого газа несжимаемы и неподвижны, пористость постоянна, газы являются калорически совершенными:

$$\phi, \rho_{sk}, \rho_{h(i)} = \text{const}, v_{sk}, v_{h(i)} = 0, \rho_{g(i)} = p/R_{g(i)} T.$$

Здесь ϕ – пористость; ρ_{sk} и v_{sk} – соответственно плотность и скорость скелета пористой среды; ρ_h и v_h – соответственно плотность и скорость гидрата; ρ_g – плотность газовой фазы; p – давление; T – температура; R_g – приведенная газовая постоянная. Здесь и в дальнейшем нижние индексы $i=m$ и d соответствуют параметрам метана и диоксида углерода или их гидратам. Кроме того, примем одно-температурную модель пористой среды, т. е. температура пористой среды и насыщающего её вещества в данной точке совпадают. Будем полагать, что гидраты углекислого газа и метана являются двухкомпонентными системами с массовыми долями газа соответственно G_d и G_m .

Система основных уравнений, включающая в себя уравнения неразрывности и притока тепла в пренебрежении баротермического эффекта, а также закон Дарси при отмеченных выше допущениях имеют вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi S_{g(i)} \rho_{g(i)}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \phi S_{g(i)} v_{g(i)} \rho_{g(i)}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) + c_{g(i)} \rho_{g(i)} \phi S_{g(i)} v_{g(i)} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (2)$$

$$\phi S_{g(i)} v_{g(i)} = - \frac{k_{g(i)}}{\mu_{g(i)}} \frac{\partial p}{\partial r}. \quad (3)$$

Здесь r – радиальная координата; t – время; $S_{g(i)}$, $v_{g(i)}$, $c_{g(i)}$, $\mu_{g(i)}$ – соответственно насыщенность пор, скорость, удельная теплоемкость, вязкость газовой фазы ($i=d, m$), ρc – удельная объемная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности. Поскольку основной вклад в теплопередачу вносят параметры скелета, то ρc и λ будем считать постоянными величинами. Зависимость коэффициента проницаемости $k_{g(i)}$ газовой фазы от текущей газонасыщенности будем задавать на основе формулы Козени [21]:

$$k_{g(i)} = k_0 S_{g(i)}^3,$$

где k_0 – коэффициент абсолютной проницаемости пласта.

Поскольку, как было отмечено выше, перемешивание газов отсутствует и имеется устойчивый фронт вытеснения $r=r_{(n)}$, условия баланса массы и тепла на нем имеют вид [14–16, 22, 23]:

$$\begin{aligned}\phi S_{g(d)} \rho_{g(d)} (v_{g(d)} - \dot{r}_{(n)}) &= \phi S_{h(d)} G_{(d)} \rho_{h(d)} \dot{r}_{(n)}, \\ \phi S_{g(m)} \rho_{g(m)} (v_{g(m)} - \dot{r}_{(n)}) &= \phi S_{h(m)} G_{(m)} \rho_{h(m)} \dot{r}_{(n)},\end{aligned}\quad (4)$$

$$\begin{aligned}\lambda \frac{\partial T_{(d)}}{\partial r} - \lambda \frac{\partial T_{(m)}}{\partial r} &= \\ &= \phi (\rho_{h(d)} S_{h(d)} L_{h(d)} - \rho_{h(m)} S_{h(m)} L_{h(m)}) \dot{r}_{(n)}.\end{aligned}\quad (5)$$

Здесь $\dot{r}_{(n)}$ – скорость движения границы фазового перехода. Применив к (4) закон Дарси (3), получим:

$$-\frac{k_{g(d)}}{\mu_{g(d)}} \frac{\partial p_{(d)}}{\partial r} = \phi \left(S_{g(d)} + \frac{S_{h(d)} G_{(d)} \rho_{h(d)}}{\rho_{g(d)}} \right) \dot{r}_{(n)}, \quad (6)$$

$$-\frac{k_{g(m)}}{\mu_{g(m)}} \frac{\partial p_{(m)}}{\partial r} = \phi \left(S_{g(m)} + \frac{S_{h(m)} G_{(m)} \rho_{h(m)}}{\rho_{g(m)}} \right) \dot{r}_{(n)}. \quad (7)$$

Кроме того, давление и температуру на данной границе будем считать величинами непрерывными:

$$p_{(d)} = p_{(m)} = p_{(n)}, \quad r = r_{(n)}, \quad (8)$$

$$T_{(d)} = T_{(m)} = T_{(n)}, \quad r = r_{(n)}. \quad (9)$$

Поскольку вся вода, находящаяся в составе гидрата метана, при замещении переходит в состав гидрата углекислого газа, то:

$$\phi(1 - G_d) \rho_{h(d)} S_{h(d)} = \phi(1 - G_m) \rho_{h(m)} S_{h(m)}. \quad (10)$$

В начальный момент времени пласт насыщен гидратом метана с гидратонасыщенностью $S_{h(m)}=v$ и находится под давлением p_0 и температурой T_0 ,

$$t = 0: \quad p = p_0, \quad T = T_0, \quad S_{h(m)} = v. \quad (11)$$

Тогда для гидратонасыщенности ближней области из (10) можно записать:

$$S_{h(d)} = \frac{\rho_{h(m)}(1 - G_m)}{\rho_{h(d)}(1 - G_d)} v.$$

Через скважину закачивается углекислый газ с параметрами p_e и T_e :

$$r = r_w, \quad t > 0: \quad p = p_e, \quad T = T_e. \quad (12)$$

На контуре питания поставим условия отсутствия потока тепла и постоянства давления (открытая граница):

$$r = R_k, \quad t > 0: \quad p = p_0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (13)$$

Применив к (1) закон Дарси (3) и пренебрегая изменением температуры в пласте по сравнению с исходной температурой, получим уравнение пьезопроводности для обеих областей:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k_{g(i)}}{\phi S_{g(i)} \mu_{g(i)}} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r p \frac{\partial p}{\partial r} \right). \quad (14)$$

Уравнение теплопроводности (2) можно также привести к виду:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - c_{g(i)} \rho_{g(i)} \frac{k_{g(i)}}{\mu_{g(i)}} \frac{\partial p}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (15)$$

Для решения задачи (14), (15) с начально-граничными условиями (11)–(13) и условиями (5)–(9) на границе фазового перехода данная система дифференциальных уравнений в частных производных представляется в виде неявной конечно-разностной схемы. Для ее решения используем метод ловли фронта в узел пространственной сетки, суть которого заключается в том, что за неизвестный и определяемый в ходе решения задачи временной шаг τ^{j+1} фронт фазового перехода перемещается по координатной сетке ровно на один шаг. Решение системы уравнений проводилось на каждом временном слое методом итераций. Число точек разбиения по пространственной координате $n=2000$.

Анализ результатов

На рис. 2 представлены распределения температуры и давления от координаты (рис. 2, а) для моментов времени $t=150$ сут. (линия 1) и 250 сут. (линия 2) и от времени (рис. 2, б) для точек с координатами $r=20,1$ (линия 1) и 50,1 м (линия 2) при нагнетании в пласт диоксида углерода под давлением $p_e=3,2$ МПа и температурой $T_e=274$ К. Для остальных параметров, характеризующих систему, приняты следующие значения $\phi=0,1$, $v=0,2$, $k_0=10^{-14}$ м², $p_0=3$ МПа, $T_0=274$ К, $\rho_e=2,5 \cdot 10^6$ Дж/К·м³, $\lambda=2$ Вт/м·К, $G_1=0,28$, $G_2=0,13$, $R_{g(d)}=189$ Дж/кг·К, $R_{g(m)}=520$ Дж/кг·К, $\rho_{h(d)}=1100$ кг/м³, $\rho_{h(m)}=900$ кг/м³, $\mu_{h(d)}=1,3 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\mu_{h(m)}=10^{-5}$ Па·с, $L_{h(d)}=4 \cdot 10^5$ Дж/кг, $L_{h(m)}=4,5 \cdot 10^5$ Дж/кг, $c_{h(d)}=800$ Дж/кг·К, $c_{h(m)}=1560$ Дж/кг·К, $r_w=0,1$ м, $R_k=100,1$ м. Как следует из рисунка, температура пласта на фронте фазового перехода поднимается выше исходной. Это объясняется тем, что объемная плотность энергии фазового перехода при образовании гидрата углекислого газа выше, чем при разложении гидрата метана. При этом давление в пласте практически не изменяется с течением времени.

На рис. 3 представлена зависимость координаты фазовых переходов от времени при нагнетании газа под давлением $p_e=3,2$ МПа. Линии 1 и 2 соответствуют значениям абсолютной проницаемости $k_0=10^{-13}$ и 10^{-14} м². Как следует из рисунка, с течением времени скорость движения границы фазового перехода уменьшается. Согласно рассматриваемой постановке, данная скорость лимитируется поступлением двуокиси на границу раздела, которая, в свою очередь, прямо пропорциональна проницаемости, и уменьшается по мере продвижения фронта вглубь пласта.

На рис. 4 представлены зависимости температуры на границе фазовых переходов (а) и ее координаты (б) от давления нагнетаемого газа для момента времени $t=10$ сут. при разных значениях исходной гидратонасыщенности пласта $v=0,2$ (кривая 1) и 0,4 (кривая 2). Остальные параметры соответствуют рис. 2. Рис. 4, а показывает, что температура на фронте замещения увеличивается с ростом давления инъекции до определенного значения, за-

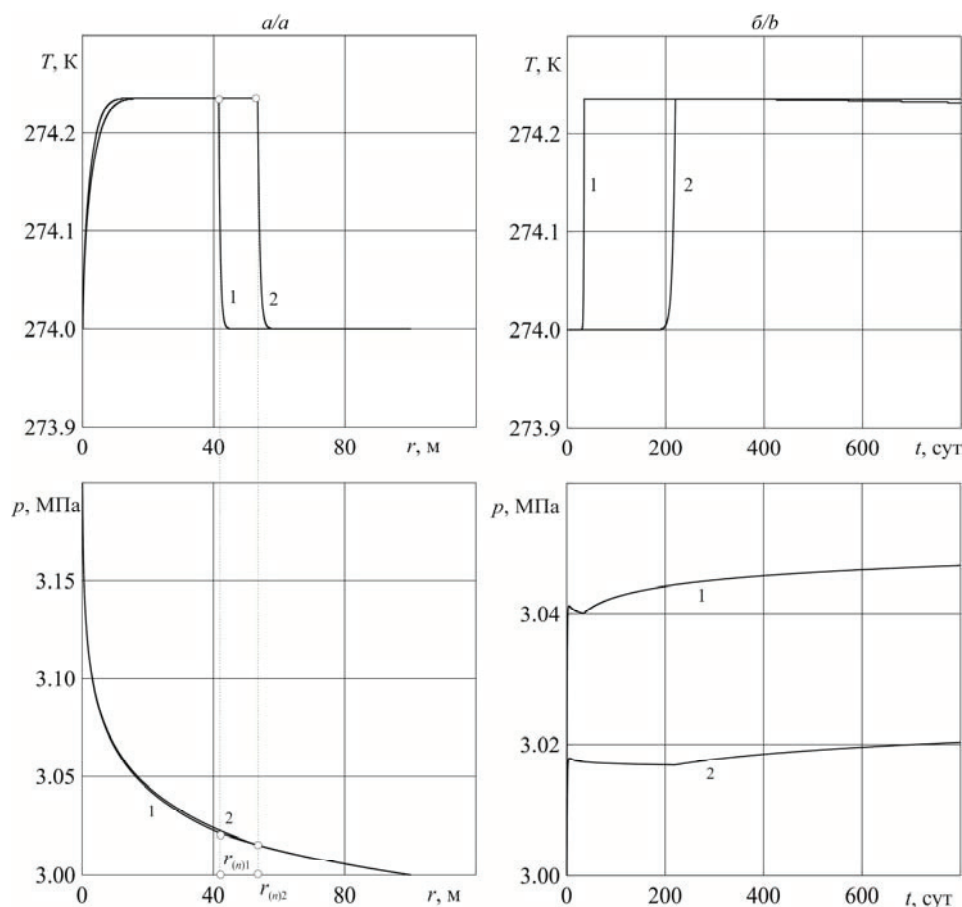


Рис. 2. Зависимость температуры и давления от координаты (а) и от времени (б)

Fig. 2. Dependence of temperature and pressure on the coordinate (a) and time (b)

висящего от исходной гидратонасыщенности пласта. Это обусловлено тем, что часть тепла, выделяющегося на фронте замещения, отводится теплопроводностью через левую границу пласта. А согласно рис. 4, б, с ростом давления закачки углекислого газа координата границы фазового перехода увеличивается, т. е. уменьшается эффективность отвода тепла через левую границу. При высоких значениях давления закачиваемого газа температура на фронте замещения стремится к своему предельному значению, определяемому формулой:

$$T_{\max} = T_0 + \frac{\phi(\rho_{hc}L_{hc}S_{hc} - \rho_{hm}L_{hm}S_{hm})}{\rho c} =$$

$$= T_0 + \frac{\phi \nu \rho_{hm}(L_{hc}(1 - G_m) - L_{hm}(1 - G_c))}{(1 - G_c)\rho c}.$$

На ис. 5, а представлены зависимости времени полной гидратации пористой среды от давления нагнетаемого газа. Линии 1 и 2 соответствуют значениям абсолютной проницаемости $k_0 = 10^{-14}$ и 10^{-15} м^2 . Как следует из рисунка, рост давления нагнетаемого газа приводит к уменьшению времени гидратации. Это объясняется тем, что скорость гидратации зависит от скорости поступления углекислого газа.

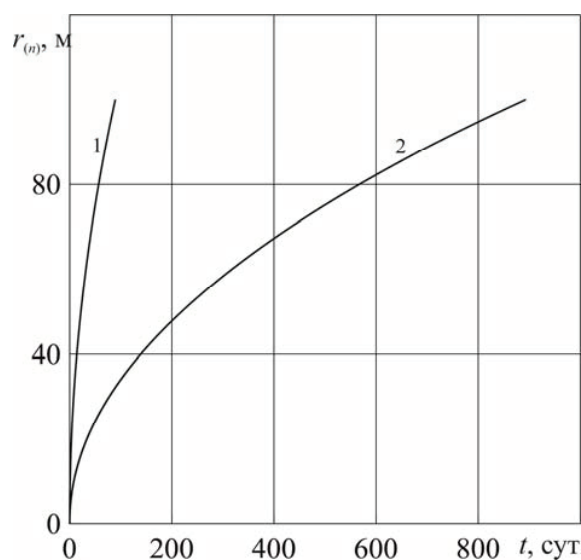


Рис. 3. Зависимость координаты границы фазового перехода от времени при значениях абсолютной проницаемости пласта: 1 – $k_0 = 10^{-14} \text{ м}^2$, 2 – $k_0 = 10^{-15} \text{ м}^2$

Fig. 3. Relation of phase boundary coordinate on time with absolute formation permeability: 1 – $k_0 = 10^{-14} \text{ м}^2$, 2 – $k_0 = 10^{-15} \text{ м}^2$

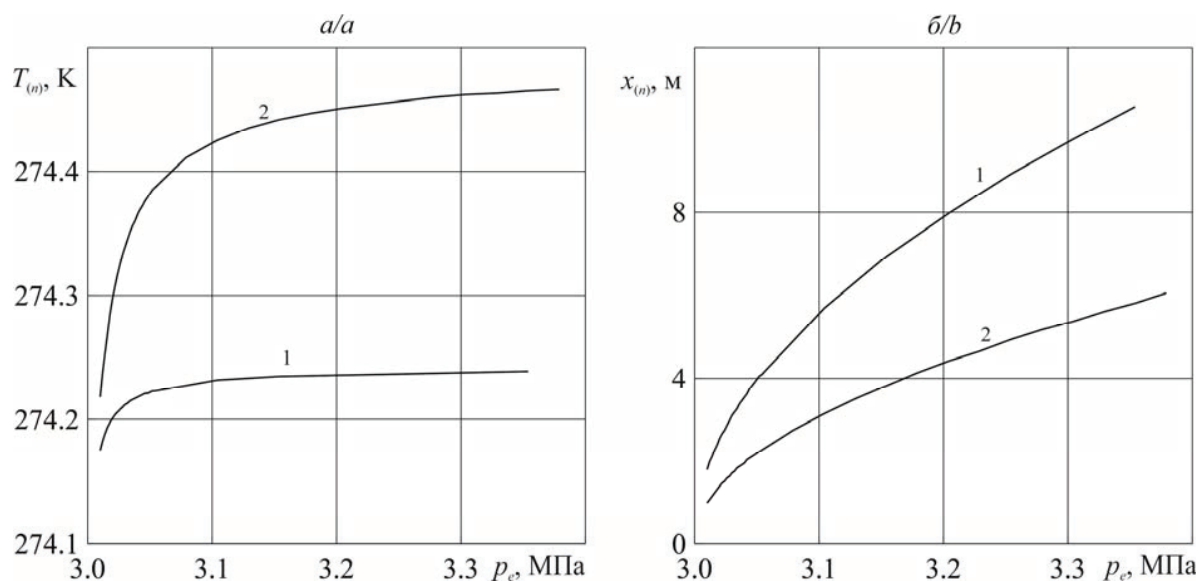


Рис. 4. Зависимости температуры на границе фазовых переходов (а) и ее координаты (б) от давления нагнетаемого газа: 1) $v=0,2$; 2) $v=0,4$

Fig. 4. Temperature – injected gas pressure dependence at phase boundaries (a) and its coordinates (b): 1) $v=0,2$; 2) $v=0,4$

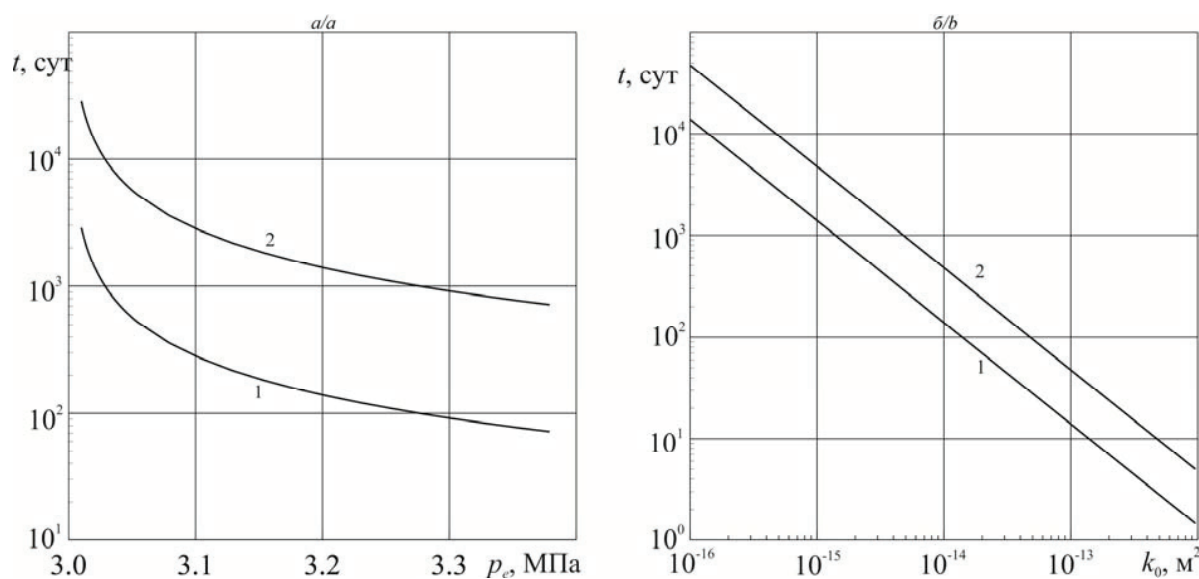


Рис. 5. Зависимость времени гидратообразования от давления нагнетаемого газа (а) и абсолютной проницаемости пласта (б)

Fig. 5. Dependence of hydrate formation time on injected gas pressure (a) and formation absolute permeability (b)

На рис. 5, б представлены зависимости времени полной гидратации от значения абсолютной проницаемости пласта. Линии 1 и 2 соответствуют значениям исходной гидратонасыщенности пласта $v=0,2$ и $0,4$.

Выводы

1. Представлена математическая модель инъекции диоксида углерода в пористый пласт, изначально насыщенный метаном и его гидратом, в осесимметричной постановке при параметрах, соответствующих условиям стабильного существования гидратов обоих газов

2. Установлено, что процесс замещения газогидрата сопровождается незначительным понижением давления и повышением температуры среды.
 3. Показано, что температура на границе фазового перехода зависит от давления закачиваемого газа. При высоких значениях давления нагнетаемого газа она стремится к своему предельному значению, зависящему от исходной гидратонасыщенности пласта.
 4. Исследована связь времени полного вытеснения метана из пласта от проницаемости и давления нагнетаемого газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Demirbas A. Methane hydrates as potential energy resource. P. 2. Methane production processes from gas hydrates // *Energy Convers. Manage.* – 2010. – V. 51. – P. 1562–1571.
2. Transport and storage of CO₂ in natural gas hydrate reservoirs / G. Ersland, J. Husebo, A. Graue, B. Kvamme // *Energy Procedia.* – 2009. – V. 1. – P. 3477–3484.
3. Sequestering carbon dioxide into complex structures of naturally occurring gas hydrates / Y. Park, D.Y. Kim, J.W. Lee, D.G. Huh, K.P. Park, J. Lee, H. Lee // *Proc. Natl. Acad. Sci. – U.S.A.*, 2006. – V. 103. – P. 12690–12694.
4. Recovering methane from solid methane hydrate with carbon dioxide / H. Lee, Y. Seo, Y.T. Seo, I.L. Moudrakovski, J.A. Ripmester // *Angew. Chem. Int. Ed.* – 2003. – V. 42. – P. 5048–5051.
5. Сравнение эффективности ингибиторов гидратообразования кинетического типа и опыт их промышленного применения в ПАО «Оренбургнефть» / А.В. Фаресов, А.И. Пономарев, Е.А. Круглов, А.П. Баряев // *Научно-технический сборник «Вести газовой науки»*. – 2016. – № 2 (26). – С. 117–122.
6. Determination of appropriate condition on replacing methane from hydrate with carbon dioxide / X.T. Zhou, S.S. Fan, D.Q. Liang, J.W. Du // *Energy Convers. Manage.* – 2008. – V. 49. – P. 2124–2129.
7. Goel N. In situ methane hydrate dissociation with carbon dioxide sequestration: Current knowledge and issues // *J. Petrol. Sci. Eng.* – 2006. – V. 51. – P. 169–184.
8. Experimental study of conditions for methane hydrate productivity by the CO₂ swap method / J.F. Zhao, L.X. Zhang, X.Q. Chen, Z. Fu, Y. Liu, Y.C. Song // *Energy Fuels.* – 2015. – V. 29. – P. 6887–6895.
9. Replacement of CH₄ in the hydrate by use of liquid CO₂ / M. Ota, K. Morohashi, Y. Abe, M. Watanabe, R.L. Smith, H. Inomata // *Energy Convers. Manage.* – 2005. – V. 46. – P. 1680–1691.
10. Methane recovery from methane hydrate using pressurized CO₂ / M. Ota, Y. Abe, M. Watanabe, R.L. Smith, H. Inomata // *Fluid Phase Equilib.* – 2005. – V. 228. – P. 553–559.
11. Experimental verification of methane-carbon dioxide replacement in natural gas hydrates using a differential scanning calorimeter / S. Lee, Y. Lee, J. Lee, H. Lee, Y. Seo // *Environ. Sci. Technol.* – 2013. – V. 47. – P. 13184–13190.
12. Shagapov V.Sh., Musakaev N.G., Khasanov M.K. Formation of gas hydrates in a porous medium during an injection of cold gas // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2015. – V. 84. – P. 1030–1039.
13. Численное моделирование образования газогидрата в пористом пласте конечной протяженности при продувке его газом / В.Ш. Шагапов, М.К. Хасанов, И.К. Гималтдинов, М.В. Столповский // *Прикладная механика и математическая физика.* – 2011. – Т. 52. – № 4. – С. 116–126.
14. Цыпкин Г.Г. Образование гидрата углекислого газа при его инъекции в истощенное месторождение углеводородов // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа.* – 2014. – № 6. – С. 101–108.
15. Хасанов М.К., Шагапов В.Ш. Разложение газогидрата метана в пористой среде при инъекции теплого углекислого газа // *Инженерно-физический журнал.* – 2016. – Т. 89. – № 5. – С. 1129–1140.
16. Хасанов М.К. Инъекция вскипающей углекислоты в пласт, сопровождающаяся замещением метана в гидрате двуокисью углерода // *Прикладная математика и механика.* – 2016. – № 5. – С. 553–565.
17. Qing Yuan, Chang-Yu Sun, Bei Liu. Methane recovery from natural gas hydrate in porous sediment using pressurized liquid CO₂ // *Energy Conversion and Management.* – 2013. – V. 67. – P. 257–264.
18. Jung J.W., Santamarina J.C. CH₄–CO₂ replacement in hydrate-bearing sediments: a pore-scale study // *Geochem. Geophys. Geosystems.* – 2010. – V. 11. – Q0AA13. DOI: 10.1029/2010GC003339.
19. Васильев В.И., Попов В.В., Тимофеева Т.С. Вычислительные методы в разработке месторождений нефти и газа. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 126 с.
20. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
21. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. – М.: Недра, 1982. – 211 с.
22. Шагапов В.Ш., Мусакаев Н.Г. Динамика образования и разложения газогидратов. – М.: Наука, 2016. – 240 с.
23. Хабибуллин И.Л., Солдаткин М.В. Динамика промерзания сезонно-талого слоя криолитозоны с учетом наличия снежного покрова // *Вестник башкирского университета.* – 2012. – Т. 17. – № 2. – С. 1131–1139.

Поступила 28.04.2017 г.

Информация об авторах

Гималтдинов И.К., доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Столповский М.В., кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры физики Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Додова М.И., магистр кафедры физики Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 532.546:536.421

NUMERICAL SOLUTION OF THE PROBLEM OF CO₂ HYDRATE GENERATION IN A POROUS MEDIUM INITIALLY SATURATED WITH METHANE HYDRATE

Ilyas K. Gimaltdinov¹,

iljas_g@mail.ru

Maksim V. Stolpovsky¹,

s_maxim.pmm@mail.ru

Margarita I. Dodova¹,

dodova.m@yandex.ru

¹ Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

The relevance of the discussed issue is caused by theoretical investigation of gas hydrate generation in porous medium with regard to production, transportation and conservation of hydrocarbon raw material.

The main aim of the study is to consider in axisymmetric formulation the replacement of methane hydrate, initially contained in a porous formation, by carbon dioxide hydrate, on the basis of the mathematical model, and to reveal the regularities of dynamics of gas hydrate generation in porous media of finite extent while injecting gas through its left boundary, with the other boundary being open to gas flow.

The methods used in the study: multiphase system mechanics together with computational method of Stefan generalized problem.

Results of the study. The paper introduces the mathematical model and numerical calculation of carbon dioxide injection into porous formation, initially saturated with methane and its hydrate in the axisymmetric formulation. The authors have used the numerical method of tracking the front node in the spatial grid to solve the problem of finding pressure and temperature distribution, and the boundary of phase transmission. The acquired numerical solutions were compared with analytical self-similar solutions. It was ascertained that gas hydrate displacement is followed by little pressure drop and reservoir temperature increase. It was shown that the temperature at the phase border depends on injected gas pressure. If the pressure is high it tends toward its cutoff value which depends on initial gas hydrate saturation in the reservoir. The authors studied as well the relation of methane total displacement from the reservoir as a function of its permeability and injected gas pressure.

Key words:

Gas hydrates, porous medium, temperature increase, formation and decomposition of hydrates, Stefan problem, phase transitions, method of tracking the front node in the spatial grid.

REFERENCES

- Demirbas A. Methane hydrates as potential energy resource: part 2-methane production processes from gas hydrates. *Energy Convers. Manage.*, 2010, vol. 51, pp. 1562–1571.
- Ersland G., Husebo J., Graue A., Kvamme B. Transport and storage of CO₂ in natural gas hydrate reservoirs. *Energy Procedia*, 2009, vol. 1, pp. 3477–3484.
- Park Y., Kim D.Y., Lee J.W., Huh D.G., Park K.P., Lee J., Lee H. Sequestering carbon dioxide into complex structures of naturally occurring gas hydrates. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 2006, vol. 103, pp. 12690–12694.
- Lee H., Seo Y., Seo Y.T., Moudrakovski I.L., Ripmeester J.A. Recovering methane from solid methane hydrate with carbon dioxide. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2003, vol. 42, pp. 5048–5051.
- Faresov A.V., Ponomarev A.I., Kruglov E.A., Barjaev A.P. Sravnenie effektivnosti ingibitorov gidratoobrazovaniya kineticheskogo tipa i opyt ikh promyshlennogo primeneniya v PAO «Orenburgneft» [Comparison of the efficiency of kinetic type hydrate inhibitors and the experience in their industrial application at Orenburgneft]. *Nauchno-tehnicheskyy sbornik «Vesti gazovoy nauki»*, 2016, no. 2 (26), pp. 117–122.
- Zhou X.T., Fan S.S., Liang D.Q., Du J.W. Determination of appropriate condition on replacing methane from hydrate with carbon dioxide. *Energy Convers. Manage.*, 2008, vol. 49, pp. 2124–2129.
- Goel N. In situ methane hydrate dissociation with carbon dioxide sequestration: Current knowledge and issues. *J. Petrol. Sci. Eng.*, 2006, vol. 51, pp. 169–184.
- Zhao J.F., Zhang L.X., Chen X.Q., Fu Z., Liu Y., Song Y.C. Experimental study of conditions for methane hydrate productivity by the CO₂ swap method. *Energy Fuels*, 2015, vol. 29, pp. 6887–6895.
- 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 Convers. Manage.*, 2005, vol. 46, pp. 1680–1691.
- Ota M., Abe Y., Watanabe M., Smith R.L., Inomata H. Methane recovery from methane hydrate using pressurized CO₂. *Fluid Phase Equilib.*, 2005, vol. 228, pp. 553–559.
- Lee S., Lee Y., Lee J., Lee H., Seo Y. Experimental verification of methane-carbon dioxide replacement in natural gas hydrates using a differential scanning calorimeter. *Environ. Sci. Technol.*, 2013, vol. 47, pp. 13184–13190.
- Shagapov V.Sh., Musakaev N.G., Khasanov M.K. Formation of gas hydrates in a porous medium during an injection of cold gas. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 84, pp. 1030–1039.
- Shagapov V.Sh., Khasanov M.K., Gimaltdinov I.K., Stolpovsky M.V. Chislennoe modelirovanie obrazovaniya gazogidrata v poristom plaste konechnoy protyazhennosti pri produvke ego gazom [Numerical simulation of gas-hydrate generation in porous layer of finite extent at its gas blow]. *Prikladnaya mekhanika i matematicheskaya fizika*, 2011, vol. 52, no. 4, pp. 116–126.
- Tsyppkin G.G. Obrazovanie gidrata uglekislogo gaza pri ego inzhektionsii v istoshchennoe mestorozhdenie uglevodorodov [Generation of carbon dioxide hydrate at its injection into depleted hydrocarbon deposit]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 2014, no. 6, pp. 101–108.

15. Khasanov M.K., Shagapov V.Sh. Razlozhenie gazogidrata metana v poristoy srede pri inzhektionsii teplogo uglekislogo gaza [Methan gas-hydrate decomposition in porous medium at injection of warm carbon dioxide]. *Inzhenerno-fizichesky zhurnal*, 2016, vol. 89, no. 5, pp. 1129–1140.
16. Khasanov M.K. Inzhektsiya vskipayushchey uglekisloty v plast, soprovozhdayushchayasya zameshcheniem metana v gidrate dvoukisyy ugleroda [Injection of boiling up carbon dioxide into a layer accompanying by methane replacement with carbon dioxide in hydrate]. *Prikladnaya matematika i mekhanika*, 2016, no. 5, pp. 553–565.
17. Qing Yuan, Chang-Yu Sun, Bei Liu. Methane recovery from natural gas hydrate in porous sediment using pressurized liquid CO₂. *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 67, pp. 257–264.
18. Jung J.W., Santamarina J.C. CH₄–CO₂ replacement in hydrate-bearing sediments: a pore-scale study. *Geochem. Geophys. Geosystems*, 2010, vol. 11, Q0AA13. DOI: 10.1029/2010GC003339.
19. Vasilev V.I., Popov V.V., Timofeeva T.S. *Vychislitelnye metody v razrabotke mestorozhdeny nefti i gaza* [Calculation techniques in oil-and-gas field development]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2000. 126 p.
20. Istomin V.A., Yakushev V.S. *Gazovye gidraty v prirodnykh usloviyakh* [Gas hydrates in natural conditions]. Moscow, Nedra Publ., 1992. 236 p.
21. Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M. *Dvizhenie zhidkostey i gazov v prirodnykh plastakh* [Movement of fluids and gases in natural layers]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 11 p.
22. Shagapov V.Sh., Musakaev N.G. *Dinamika obrazovaniya i razlozheniya gazogidratov* [Dynamics of generation and decomposition of gas-hydrates]. Moscow, Nauka Publ., 2016. 240 p.
23. Khabibullin I.L., Soldatkin M.V. Dynamics of frost penetration into seasonal thaw depth of cryolithzone considering presence of snow cover. *Vestnik bashkirskogo universiteta*, 2012, vol. 17, no. 2, pp. 1131–1139. In Rus.

Received: 28 April 2017.

Information about the authors

Ilyas K. Gimaltdinov, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Maksim V. Stolpovsky, Cand. Sc., senior lecturer, Ufa State Petroleum Technological University.

Margarita I. Dodova, master, Ufa State Petroleum Technological University.