

Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022. Вып. 1 (135). С. 9-21. ISSN 1998-8443 (print)

Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2022. Issue 1 (135). P. 9-21. ISSN 1998-8443 (print)

Научная статья

УДК 622.279.72

doi: 10.17122/ntj-oil-2022-1-9-21

ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ ЗАДАЧА О ЗАМЕЩЕНИИ МЕТАНА ИЗ ГАЗОГИДРАТНОЙ ЗАЛЕЖИ ПРИ НАГНЕТАНИИ ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА

Ангелина Сергеевна Чиглинцева¹, Миляуша Рафаэлевна Давлетшина²,
Максим Владимирович Столповский³, Екатерина Юрьевна Кочанова⁴,
Марат Камилович Хасанов⁵

^{1, 2, 3, 4}Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

⁵Башкирский государственный университет, филиал, Стерлитамак, Россия

¹changelina@rambler.ru

²davletshina@yandex.ru

³s_maxim.pmm@mail.ru

⁴moto8728@mail.ru

⁵hasanovmk@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Екатерина Юрьевна Кочанова, moto8728@mail.ru

Аннотация. Построена математическая модель для решения задачи о замещении метана из газогидратной залежи при нагнетании двуокиси углерода. В осесимметричной постановке численно исследуется процесс замещения метана из газогидратной залежи при нагнетании теплой (с температурой пласта выше исходной) двуокиси углерода.

На основе представленной математической модели установлено, что в зависимости от исходных параметров системы и инжектируемого газа процесс замещения может происходить в двух режимах: с образованием только лишь гидрата двуокиси углерода или с образованием гидрата двуокиси углерода, а также смеси метана и воды. Представлены критические диаграммы, разделяющие эти режимы.

Ключевые слова: нагнетание углекислого газа, вытеснение метана, замещение, разложение гидрата метана, критическая диаграмма

© Чиглинцева А. С., Давлетшина М. Р., Столповский М. В., Кочанова Е. Ю., Хасанов М.К., 2022

Благодарности: Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (Конкурс МД-2020) № МД-2179.2020.1.

Для цитирования: Чиглинцева А. С., Давлетшина М. Р., Столповский М. В., Кочанова Е. Ю., Хасанов М. К. Осесимметричная задача о замещении метана из газогидратной залежи при нагнетании двуокиси углерода // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022. Вып. 1 (135), С. 9-21. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2022-1-9-21>.

Original article

AXISYMMETRIC PROBLEM OF METHANE REPLACEMENT FROM A GAS HYDRATE DEPOSIT WITH CARBON DIOXIDE INJECTION

Angelina S. Chiglintseva¹, Milyausha R. Davletshina², Maksim V. Stolpovskiy³,
Ekaterina Yu. Kochanova⁴, Marat K. Khasanov⁵

^{1, 2, 3, 4}Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

⁵Bashkir State University, Branch, Sterlitamak, Russia

¹changelina@rambler.ru

²davletshina@yandex.ru

³s_maxim.pmm@mail.ru

⁴moto8728@mail.ru

⁵hasanovmk@mail.ru

Corresponding author: **Ekaterina Yu. Kochanova**, moto8728@mail.ru

Abstract. A mathematical model has been constructed for solving the problem of replacing methane from a gas hydrate deposit during carbon dioxide injection. In an axisymmetric setting, the process of replacing methane from a gas hydrate reservoir during the injection of warm (with a formation temperature higher than the initial one) carbon dioxide is numerically studied.

Based on the presented mathematical model, it was found that, depending on the initial parameters of the system and the injected gas, the replacement process can occur in two modes: with the formation of only carbon dioxide hydrate or with the formation of carbon dioxide hydrate, as well as a mixture of methane and water. Critical diagrams separating these regimes are presented.

Keywords: carbon dioxide injection, methane displacement, substitution, methane hydrate decomposition, critical diagram

Acknowledgments: The research was funded by a grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists - doctors of sciences (Competition-MD-2020), according to the research project No. MD-2179.2020.1.

For citation: Chiglintseva A. S., Davletshina M. R., Stolpovskiy M. V., Kochanova E. Yu., Khasanov M. K. Osesimmetrichnaya zadacha o zameshchenii metana iz gazogidratnoy zalezhi pri nagnetanii dvoukisi ugleroda. [Axisymmetric Problem of Methane Replacement from a Gas Hydrate Deposit with Carbon Dioxide Injection]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2022, Issue 1 (135), pp. 9-21. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2022-1-9-21>.

Введение

Увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере за счет антропогенных выбросов и, как следствие, усиление парникового эффекта являются в настоящее время одной из главных экологических проблем.

Одним из методов решения данной проблемы является улавливание углекислого газа и его инжекция в метаногидратные пласты. При этом инжекция CO_2 в такие пласты может привести к одновременному связыванию углекислого газа в гидратной форме и высвобождению метана, который может быть использован в качестве чистого топлива.

Экспериментальные исследования по замещению метана в газогидрате углекислым газом были представлены в работах [1-5].

Результаты численных исследований, сопровождаемых диссоциацией гидрата метана при нагнетании CO_2 в пористую среду, насыщенную метаногидратом, представлены, в частности, в работах [6-8].

В настоящей работе в осесимметричном приближении рассматривается задача об инжекции теплого углекислого газа в порис-

тый пласт конечной протяженности, изначально насыщенный метаном и его гидратом. Такая постановка задачи в отличие от [8], где рассматривается инжекция двуокиси углерода с температурой равной исходной температуре системы, приводит к новым эффектам. Так, показано, что при инжекции теплого углекислого газа может происходить разложение газогидрата метана на газ и воду.

Постановка задачи и основные уравнения

Условия, при которых реализуются режимы стабильного существования гетерогенной системы «гидрат - вода», принято изображать с помощью фазовой диаграммы [9], представленной на рисунке 1.

На рисунке 1 кривая 1 - кривая кипения CO_2 , а кривые 2 и 3 определяют равновесные условия разложения газогидратов CH_4 и CO_2 соответственно.

Области стабильного существования гидратов расположены выше этих кривых.

Рассмотрим однородный горизонтальный круговой пористый пласт постоянной толщины, насыщенный в начальный момент

метаногидратной смесью, давление p_0 и температура T_0 которой соответствует условиям стабильного существования как CH_4 , так и его гидрата. Это соответствует тому, что точка, определяемая на фазовой диаграмме координатами (T_0, p_0) , лежит выше кривой 2 на рисунке 1.

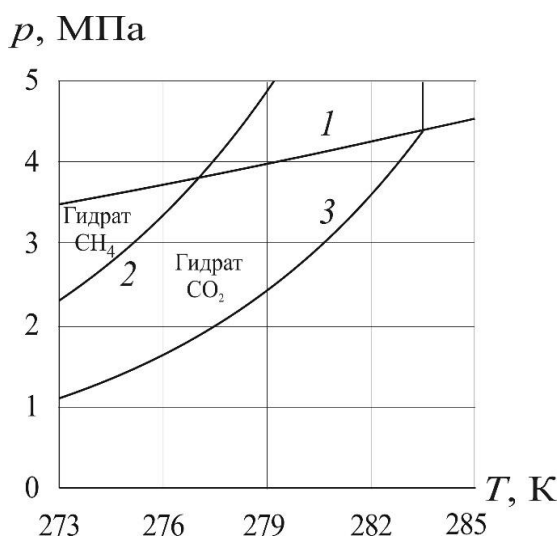


Рисунок 1. Фазовые диаграммы систем « $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ » и « $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{O}$ »

Figure 1. Phase diagrams of the « $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ » and « $\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{O}$ » systems

Положим, что углекислый газ притекает под давлением p_e и температурой T_e к скважине радиуса r_w , расположенной в центре рассматриваемого пласта, радиус контура питания которого R_k . При этом параметры (T_e, p_e) соответствуют условиям стабильного существования CO_2 и его гидрата, т.е. определяют на фазовой диаграмме точку, расположенную выше кривой 3.

В результате нагнетания диоксида углерода в пласте образуются две области. Так, в ближней, примыкающей к скважине области в порах присутствуют CO_2 и его гид-

рат, 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 указанные две области. Будем считать данную границу фазовых переходов, согласно [6, 7], устойчивой.

При описании фильтрационных процессов, происходящих в пористой среде и сопровождающихся фазовыми переходами, примем допущения о несжимаемости и неподвижности как самой среды, так и гидратов CH_4 и CO_2 .

Примем однотемпературную модель пористой среды. При этом метан и углекислый газ являются идеальными газами, а их гидраты - двухкомпонентными системами с массовыми долями газа с $G_{(m)}$ и $G_{(d)}$ соответственно.

Система основных уравнений, включающая в себя уравнения сохранения массы и энергии (в пренебрежении баротермическим эффектом), а также закон Дарси и уравнение состояния идеального газа при отмеченных выше допущениях имеют вид [8, 10-13]:

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

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

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

$$p = \rho_{g(i)} R_{g(i)} T.$$

Здесь r - радиальная координата;

t - время;

ϕ - пористость;

$S_{g(i)}, v_{g(i)}, c_{g(i)}, \mu_{g(i)}, \rho_{g(i)}$ - соответственно насыщенность пор, скорость, удельная теплоемкость, вязкость, плотность i -ой газовой фазы ($i = d, m$);

p - давление;

T - температура;
 $R_{g(i)}$ - приведенная газовая постоянная;
 ρc - удельная объемная теплоемкость;
 λ - коэффициент теплопроводности.

Поскольку основной вклад в теплопередачу вносят параметры скелета, то ρc и λ будем считать постоянными величинами. Индексы $i = d, m$ относятся к параметрам углекислого газа и метана. Зависимость коэффициента проницаемости $k_{g(i)}$ газовой фазы от текущей газонасыщенности будем задавать на основе формулы Козени [14]:

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

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 (газов и воды, содержащейся в составе гидратов) и тепла, на нем имеют вид [6, 7]:

$$\phi S_{g(d)} \rho_{g(d)} (v_{g(d)} - v_{(n)}) = \phi S_{h(d)} G_{(d)} \rho_{h(d)} v_{(n)}, \quad (2)$$

$$\phi S_{g(m)} \rho_{g(m)} (v_{g(m)} - v_{(n)}) = \phi S_{h(m)} G_{(m)} \rho_{h(m)} v_{(n)}, \quad (3)$$

$$m \rho_{h(d)} (1 - G_{(d)}) S_{h(d)} v_{(n)} = m \rho_{h(m)} (1 - G_{(m)}) S_{h(m)} v_{(n)}, \quad (4)$$

$$\lambda \frac{\partial T_{(d)}}{\partial r} - \lambda \frac{\partial T_{(m)}}{\partial r} = \phi (\rho_{h(d)} S_{h(d)} L_{h(d)} - \rho_{h(m)} S_{h(m)} L_{h(m)}) v_{(n)}. \quad (5)$$

Здесь $S_{h(i)}$ и $\rho_{h(i)}$ ($i = d, m$) - соответственно гидратонасыщенность и плотность гидрата;

$L_{h(i)}$ - удельная теплота фазового перехода «гидрат диоксида углерода ($i = c$) - гидрат метана ($i = m$)»;

$v_{(n)}$ - скорость движения границы фазового перехода.

Давление и температуру на границе будем считать величинами непрерывными.

Применив закон Дарси, уравнения (2) и (3) можно представить в виде:

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

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

Здесь $p_{(d)}$ и $p_{(m)}$ - давления в области диоксида углерода и метана соответственно.

Уравнение пьезопроводности и теплопроводности, описывающие распределения давления и температуры пласта и полученные из системы (1), имеют вид:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k_{g(i)}}{\phi S_{g(i)} \mu_{g(i)}} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r p \frac{\partial p}{\partial r} \right), \quad (8)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - c_{g(i)} \rho_{g(i)} \frac{k_{g(i)}}{\mu_{g(i)}} \frac{\partial p}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (9)$$

Следует отметить, что при выводе (8) пренебрегалось изменением температуры в пласте по сравнению с его исходной температурой.

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

$$t = 0: p = p_0, T = T_0, S_{h(m)} = v. \quad (10)$$

Тогда из (4) для величины гидратонасыщенности в ближней области имеем:

$$S_{h(d)} = \frac{\rho_{h(m)} (1 - G_{(m)})}{\rho_{h(d)} (1 - G_{(d)})} v. \quad (11)$$

На скважине ($r = r_w$) и на контуре питания ($r = R_k$) зададим следующие условия:

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

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

Для решения задачи (8), (9) с начальными и граничными условиями (10), (12), (13) и условиями (5)-(7) на границе фазового перехода используется метод ловли фронта в узел пространственной сетки [8, 15] в сочета-

нии с методом итераций и алгоритмом прогонки.

При этом вводится равномерная сетка с шагом $h = (R_k - r_w)/N$, где N - число точек разбиения расчетной области; уравнением пьезо- и теплопроводности (8) и (9) ставятся в соответствии неявные конечно-разностные аналоги:

$$\frac{p_j^{s+1} - p_i^s}{\tau} = \frac{k_{g(i)}}{\phi S_{g(i)} \mu_{g(i)}} \frac{1}{r_j} \frac{1}{h} \left(r_{j+1/2} \cdot p_{j+1/2}^{s+1} \frac{p_{j+1}^{s+1} - p_j^{s+1}}{h} - r_{j-1/2} \cdot p_{j-1/2}^{s+1} \frac{p_j^{s+1} - p_{j-1}^{s+1}}{h} \right), \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \rho c \frac{T_j^{s+1} - T_j^s}{\tau} - c_{g(i)} \frac{k_{g(i)}}{\mu_{g(i)} R_{g(i)}} \frac{p_j^{s+1} - p_{j-1}^{s+1}}{h} \frac{T_j^{s+1} - T_{j-1}^{s+1}}{h} = \\ = \frac{\lambda}{r_i \cdot h} \left(r_{j+1/2} \frac{T_{j+1}^{s+1} - T_j^{s+1}}{h} - r_{j-1/2} \frac{T_j^{s+1} - T_{j-1}^{s+1}}{h} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь j - номер узла;

τ - величина временного шага, определяемая в ходе решения задачи;

верхние индексы s и $s+1$ относятся к величинам на текущем («старом») и следующем («новом») временных слоях.

При этом

$$\begin{aligned} r_{j+1/2} &= (r_j + r_{j+1}) / 2, \\ p_{j+1/2}^{s+1} &= (p_j^{s+1} + p_{j+1}^{s+1}) / 2. \end{aligned}$$

Аналогично уравнения (5)-(7) на границе фазового перехода представляются в виде:

$$\lambda \frac{T_n^{s+1} - T_{n-1}^{s+1}}{h} - \lambda \frac{T_{n+1}^{s+1} - T_n^{s+1}}{h} = \phi \left(\rho_{h(d)} S_{h(d)} L_{h(d)} - \rho_{h(m)} S_{h(m)} L_{h(m)} \right) \frac{h}{\tau}, \quad (16)$$

$$-\frac{k_{g(d)}}{\mu_{g(d)}} \frac{p_n^{s+1} - p_{n-1}^{s+1}}{h} = \phi \left(S_{g(d)} + \frac{S_{h(d)} G_{(d)} \rho_{h(d)} R_{g(d)} T_n^{s+1}}{p_n^{s+1}} \right) \frac{h}{\tau}, \quad (17)$$

$$-\frac{k_{g(m)}}{\mu_{g(m)}} \frac{p_{n+1}^{s+1} - p_n^{s+1}}{h} = \phi \left(S_{g(m)} + \frac{S_{h(m)} G_{(m)} \rho_{h(m)} R_{g(m)} T_n^{s+1}}{p_n^{s+1}} \right) \frac{h}{\tau}. \quad (18)$$

Здесь n - номер узла, соответствующий положению границы фазовых переходов.

Положим, что начальные (на текущем s -ом временном слое) распределения давления и температуры известны. Поскольку решение задачи осуществляется методом итераций, также считаем известными значения временного шага τ^l , а также распределения давления p_j^l , T_j^l на «новом» $(s+1)$ -ом временном слое для какой-либо l -ой итерации.

Чтобы определить уточненные значения этих величин для $(l+1)$ -й итерации, поступаем следующим образом.

Сначала решаем методом прогонки систему уравнений (14) с граничными условиями (12) и (17), из чего определяются «новые» (в смысле итераций) значения давления в первой области.

С учетом уже найденного граничного давления в n -ом узле p_n^{l+1} и условия (13) с помощью решения системы (14) находится распределение давления во второй области.

Аналогично решается система уравнений (15) с граничными условиями (12) и (13). При этом на фронте фазового перехода вместо (15) рассматривается уравнение (16).

Новое приближение временного шага на текущем временном слое находится как среднее геометрическое временных шагов, определяемых из (17) и (18).

Данная процедура повторяется до достижения заданной точности как по давлению и температуре, так и по временному шагу.

Далее переходим к следующему временному слою.

Анализ результатов

На рисунке 2 для момента времени $t = 150$ сут представлены распределения температуры и давления в пласте при нагнетании углекислого газа под давлением $p_e = 3,4$ МПа и температурой $T_e = 280$ К.

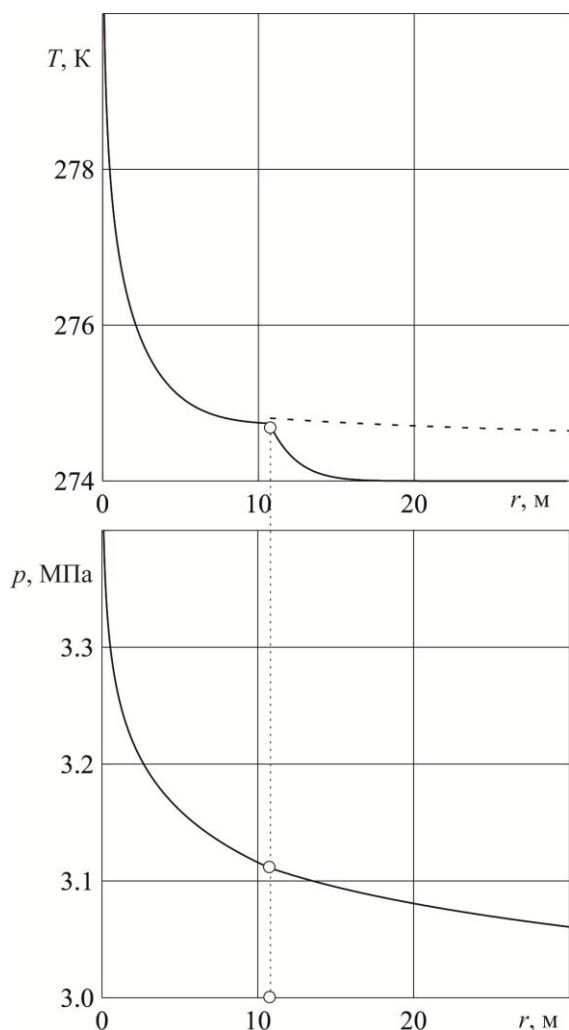
Для остальных параметров, характеризующих систему, приняты следующие значения:

$$\begin{aligned} \phi &= 0.2, \\ \nu &= 0.3, \\ k_0 &= 10^{-15} \text{ м}^2, \\ \rho_0 &= 3 \text{ МПа}, \\ T_0 &= 274 \text{ К}, \\ \rho c &= 2,5 \cdot 10^6 \text{ Дж / (К} \cdot \text{м}^3), \\ \lambda &= 2 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}, \\ G_{(d)} &= 0,28, \\ G_{(m)} &= 0,13, \\ R_{g(d)} &= 189 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{К)}, \\ R_{g(m)} &= 520 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{К)}, \\ \rho_{H(d)} &= 1100 \text{ кг / м}^3, \\ \rho_{H(m)} &= 900 \text{ кг / м}^3, \\ \mu_{g(d)} &= 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}, \\ \mu_{g(m)} &= 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}, \\ L_{H(d)} &= 4,1 \cdot 10^5 \text{ Дж / кг}, \\ L_{H(m)} &= 4,5 \cdot 10^5 \text{ Дж / кг}, \\ c_{g(d)} &= 800 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{К)}, \\ c_{g(m)} &= 1560 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{К)}, \\ r_w &= 0.1 \text{ м}, \\ R_k &= 100.1 \text{ м}. \end{aligned}$$

Из рисунка 2 следует, что при данных параметрах системы и нагнетаемого газа решение задачи о замещении гидрата метана является термодинамически непротиворечивым. Это означает, что температура в области существования метана и его гидрата лежит ниже равновесной температуры разложения газогидрата метана (штриховая линия), определяемой из выражения [16]:

$$T_{(s)} = T_0 + T_* \ln \left(\frac{p}{p_{s0}} \right), \quad (19)$$

где $T_* = 10$ К, $p_{s0} = 2,87$ МПа - постоянные, зависящие от вида газогидрата.



Штриховая линия соответствует
равновесной температуре

The dashed line corresponds
to the equilibrium temperature

Рисунок 2. Распределение температуры
и давления в момент времени $t = 150$ сут

Figure 2. Distribution of temperature
and pressure at time $t = 150$ days

На рисунке 3 представлены распределения температуры и давления в пласте при таких значениях параметров, при которых модель с фронтальной границей замещения

является физически противоречивой. Это означает, что локальная температура в области, насыщенной метаном и его гидратом, поднимается выше равновесной температуры. Тем самым необходимо вводить еще одну область, содержащую метан и воду в свободном состоянии; при этом гидрат CO_2 образуется из воды и газа.

Параметры системы, не указанные в подрисуночных подписях (рисунок 3), имеют значения, соответствующие значениям на рисунке 2.

Из рисунка 3 следует, что значения исходного давления системы, давления нагнетаемого газа, а также проницаемости пласта оказывают существенное влияние на реализацию того или иного режим образования гидрата углекислого газа.

Согласно рисунку 3 уменьшение давления нагнетания газа (рисунок 3, *a*) и проницаемости пласта (рисунок 3, *b*), а также увеличение исходного давления (рисунок 3, *c*) по сравнению с параметрами, соответствующими рисунку 2, приводит к тому, что скорость движения фронта фазового перехода, которая лимитируется интенсивностью подвода к ней CO_2 , уменьшается. При этом возрастает влияние более высокой температуры скважины на температуру границы фазового перехода.

Поскольку режим с разложением газогидрата метана на газ и воду реализуется вследствие инъекции теплого газа, то температура скважины также оказывает существенное влияние на реализацию того или иного режим образования гидрата углекислого газа.

На рисунке 4 представлена зависимость критической температуры закачиваемого газа, при превышении которой реализуется режим образования гидрата CO_2 из воды, от абсолютной проницаемости пласта для момента времени $t = 10$ сут.

Как следует из рисунка 4, с увеличением проницаемости, а также давления нагнетаемого газа значение критической температуры также увеличивается. Это объясняется тем, что скорость движения границы фазово-

го перехода увеличивается с ростом этих величин. Поэтому для образования гидрата CO_2 из воды необходимо, чтобы температура на скважине увеличивалась.

Переменный характер зависимости критической температуры от начального давления p_0 объясняется тем, что, с одной стороны, повышение данного давления приводит к увеличению давления в пласте, а, значит, и связанной с ней равновесной температуры

разложения газогидрата метана. С другой стороны, повышение давления p_0 (равному давлению на правой границе пласта) уменьшает перепад давления, а, значит, и скорость движения фронта фазового перехода.

Соответственно, при этом температура на данном фронте увеличивается (за счет сокращения расстояния до более нагретой скважины).

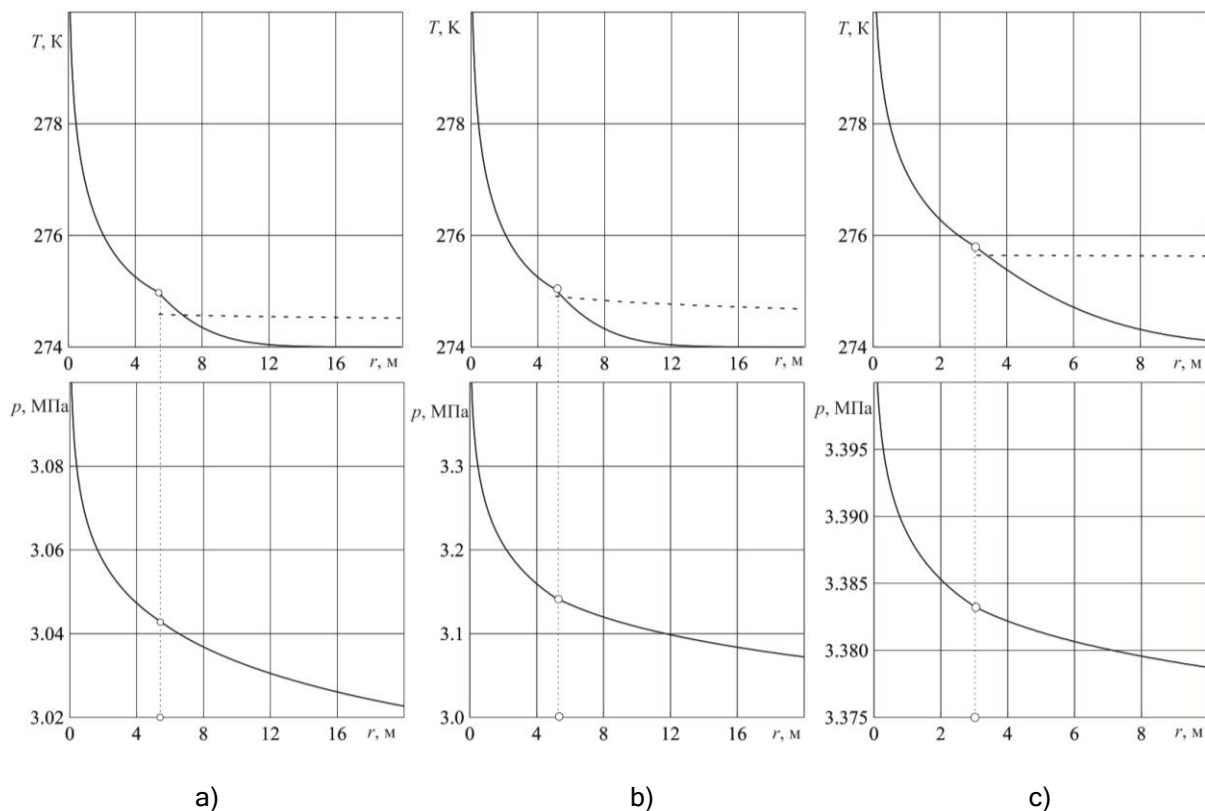


Рисунок 3. Распределение температуры и давления в момент времени $t = 150$ сут:

$$p_e = 3,1 \text{ МПа (a); } k_0 = 2 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2 \text{ (b); } p_0 = 3,37 \text{ МПа (c)}$$

Figure 3. Distribution of temperature and pressure at a point in time $t = 150$ days:

$$p_e = 3,1 \text{ МПа (a); } k_0 = 2 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2 \text{ (b); } p_0 = 3,37 \text{ МПа (c)}$$

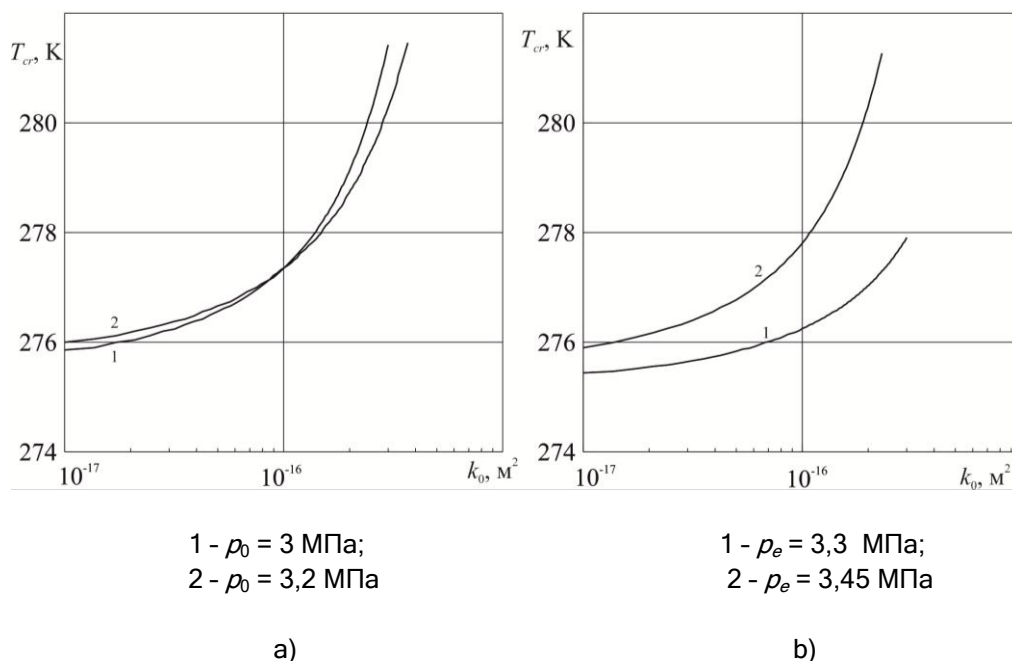


Рисунок 4. Зависимость критической температуры от абсолютной проницаемости пласта
Figure 4. Dependence of the critical temperature on the formation absolute permeability

Выводы

В работе методом ловли фронта в узел пространственной сетки решена задача о замещении метана из газогидратной залежи при инъекции теплой газообразной двуокиси углерода.

Показано, что образование гидрата двуокиси углерода может происходить в ре-

жимах без диссоциации и с диссоциацией гидрата метана.

Установлено, что основными факторами, определяющими тот или иной режим, являются как исходные параметры системы, так и параметры инжектируемого газа. Построены критические диаграммы, разделяющие эти два режима.

Список источников

1. Ersland G., Husebo J., Graue A., Baldwin B.A., Howard J., Stevens J. Measuring Gas Hydrate Formation and Exchange with CO₂ in Bentheim Sandstone Using MRI Tomography // *Chemical Engineering Journal*, 2010. Vol. 158. Issue 1. P. 25-31. DOI: 10.1016/j.cej.2008.12.028.

References

1. Ersland G., Husebo J., Graue A., Baldwin B.A., Howard J., Stevens J. Measuring Gas Hydrate Formation and Exchange with CO₂ in Bentheim Sandstone Using MRI Tomography. *Chemical Engineering Journal*, 2010, Vol. 158, Issue 1, pp. 25-31. DOI: 10.1016/j.cej.2008.12.028.

2. Goel N. In Situ Methane Hydrate Dissociation with Carbon Dioxide Sequestration: Current Knowledge and Issues // *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2006. Vol. 51. Issue 3-4. P. 169-184. DOI: 10.1016/j.petrol.2006.01.005.
3. 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. Issue 41. P. 5048-5051. DOI: 10.1002/anie.200351489.
4. 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 // *Environmental Science and Technology*, 2013. Vol. 47. Issue 22. P. 13184-13190. DOI: 10.1021/es403542z.
5. 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. Issues 11-12. P. 1680-1691. DOI: 10.1016/j.enconman.2004.10.002.
6. 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.
7. Shagapov V.Sh., Khasanov M.K., Musakaev N.G., Duong Ngoc Hai. Theoretical Research of the Gas Hydrate Deposits Development Using the Injection of Carbon Dioxide // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017. Vol. 107. P. 347-357. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.034.
8. Гималтдинов И.К., Столповский М.В., Додова М.И. Численное решение задачи об образовании гидрата двуокиси углерода в пористом пласте, изначально насыщенном гидратом метана // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2017. Т. 328. № 6. С. 91-98.
9. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992. 235 с.
10. Шагапов В.Ш., Мусакаев Н.Г. Динамика образования и разложения газогидратов. М.: Наука, 2016. 240 с.
11. Musakaev N.G., Khasanov M.K., Borodin S.L. The Mathematical Model of the Gas Hydrate Deposit Development in Permafrost // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018. Vol. 118. P. 455-461. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.127.
12. Хасанов М.К., Мусакаев Н.Г., Гималтдинов И.К. Особенности разложения газогидратов с образованием льда в пористой среде // *Инженерно-физический журнал*. 2015. Т. 88. № 5. С. 1022-1030.
13. Гималтдинов И.К., Хасанов М.К. Математическая модель образования газогидрата при инъекции газа в пласт, частично насыщенный льдом // *Прикладная математика и механика*. 2016. Т. 80. № 1. С. 80-90.
14. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пла-
2. Goel N. In Situ Methane Hydrate Dissociation with Carbon Dioxide Sequestration: Current Knowledge and Issues. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2006, Vol. 51, Issue 3-4, pp. 169-184. DOI: 10.1016/j.petrol.2006.01.005.
3. 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, Issue 41, pp. 5048-5051. DOI: 10.1002/anie.200351489.
4. 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. *Environmental Science and Technology*, 2013, Vol. 47, Issue 22, pp. 13184-13190. DOI: 10.1021/es403542z.
5. 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, Issues 11-12, pp. 1680-1691. DOI: 10.1016/j.enconman.2004.10.002.
6. Khasanov M.K., Shagapov V.Sh. Razlozhenie gazogidrata metana v poristoi srede pri inzhetskii teplogo uglekislogo gaza [Methane Gas Hydrate Decomposition in a Porous Medium Upon Injection of a Warm Carbon Dioxide Gas]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal - Inzhenerno-Fizicheskii Zhurna*, 2016, Vol. 89, No. 5, pp. 1129-1140. [in Russian].
7. Shagapov V.Sh., Khasanov M.K., Musakaev N.G., Duong Ngoc Hai. Theoretical Research of the Gas Hydrate Deposits Development Using the Injection of Carbon Dioxide. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, Vol. 107, pp. 347-357. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.034.
8. Gimaltdinov I.K., Stolpovskii M.V., Dodova M.I. Chislennoe reshenie zadachi ob obrazovanii gidrata dvoukisi ugleroda v poristom plaste, iznachal'no насыshchennom gidratom metana [Numerical Solution of the Problem of the Formation of Carbon Dioxide Hydrate in a Porous Formation Initially Saturated with Methane Hydrate]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov - Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, Vol. 328, No. 6, pp. 91-98. [in Russian].
9. Istomin V.A., Yakushev V.S. *Gazovye gidraty v prirodnykh usloviyakh* [Gas Hydrates in Natural Conditions]. Moscow, Nedra Publ., 1992. 235 p. [in Russian].
10. Shagapov V.Sh., Musakaev N.G. *Dinamika obrazovaniya i razlozheniya gazogidratov* [Dynamics of Formation and Decomposition of Gas Hydrates]. Moscow, Nauka Publ., 2016. 240 p. [in Russian].
11. Musakaev N.G., Khasanov M.K., Borodin S.L. The Mathematical Model of the Gas Hydrate Deposit Development in Permafrost. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, Vol. 118, pp. 455-461. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.127.
12. Khasanov M.K., Musakaev N.G., Gimaltdinov I.K. Osobennosti razlozheniya gazogidratov s obrazovaniem l'da v poristoi srede

стах. М.: Недра, 1982. 211 с.

15. 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.

16. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. М.: Химия, 1980. 296 с.

[Features of the Decomposition of Gas Hydrates with the Formation of Ice in a Porous Medium]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal - Inzhenerno-Fizicheskii Zhurna*, 2015, Vol. 88, No. 5, pp. 1022-1030. [in Russian].

13. Gimaltdinov I.K., Khasanov M.K. Matematicheskaya model' obrazovaniya gazogidrata pri inzhektsii gaza v plast, chastichno насыщенный l'dom [Mathematical Model of the Formation of a Gas Hydrate on the Injection of Gas into a Stratum Partially Saturated with Ice]. *Prikladnaya matematika i mekhanika - Prikladnaya Matematika I Mekhanika*, 2016, Vol. 80, No. 1, pp. 80-90. [in Russian].

14. Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M. *Dvizhenie zhidkosti i gazov v prirodnykh plastakh* [Movement of Liquids and Gases in Natural Reservoirs]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 211 p. [in Russian].

15. Vasilev V.I., Popov V.V., Timofeeva T.S. *Vychislitel'nye metody v razrabotke mestorozhdenii nefii i gaza* [Computational Methods in the Development of Oil and Gas Fields]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2000. 126 p. [in Russian].

16. Byk S.Sh., Makogon Yu.F., Fomina V.I. *Gazovye gidraty* [Gas Hydrates]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 296 p. [in Russian].

Информация об авторах

• Чиглинцева Ангелина Сергеевна, д-р физ.-мат. наук
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Доцент кафедры «Физика»
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1
e-mail: changelina@rambler.ru

• Давлетшина Миляуша Рафаэлевна, канд. с.-х. наук
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Доцент кафедры «Физика»
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1
e-mail: davletshina@yandex.ru

• Столповский Максим Владимирович, канд. физ.-мат. наук
Уфимский государственный нефтяной технический университет
Доцент кафедры «Физика»
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1
e-mail: s_maxim.pmm@mail.ru

Information about the authors

• Chiglintseva Angelina S., Doctor of Physical and Mathematical Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Physics Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia
e-mail: changelina@rambler.ru

• Davletshina Milyausha R., Candidate of Agricultural Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Physics Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia
e-mail: davletshina@yandex.ru

• Stolpovskiy Maksim V., Candidate of Physical and Mathematical Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Physics Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia
e-mail: s_maxim.pmm@mail.ru

• Кочанова Екатерина Юрьевна
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Ассистент кафедры «Вычислительная техника
и инженерная кибернетика»
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1
e-mail: moto8728@mail.ru

• Kochanova Ekaterina Yu.
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant of Computing and Engineering Cybernetics
Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia
e-mail: moto8728@mail.ru

• Хасанов Марат Камирович, канд. физ.-мат. наук
Башкирский государственный университет,
филиал в г. Стерлитамак
Заведующий кафедрой прикладной
информатики и программирования
Россия, 453103, г. Стерлитамак, ул. Ленина, 49
e-mail: hasanovmk@mail.ru

• Khasanov Marat K., Candidate of Physical and
Mathematical Sciences
Bashkir State University, Branch in Sterlitamak
Head of Applied Informatics and Programming
Department
49, Lenin str., Sterlitamak, 453103, Russia
e-mail: hasanovmk@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 15.12.2021; одобрена после рецензирования 25.12.2021; принята к публика-
ции 10.01.2022.*

The article was submitted 15.12.2021; approved after reviewing 25.12.2021; accepted for publication 10.01.2022.