М.В. Столповский, А.С. Чиглинцева, Е.Ю. Кочанова (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация)

О ПРОЦЕССЕ ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОГИДРАТА В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ, НАСЫЩЕННОЙ МЕТАНОМ И ЛЬДОМ

Maxim V. Stolpovsky, Angelina S. Chiglintseva, Ekaterina Yu. Kochanova
(Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation)

ON THE PROCESS OF GAS HYDRATE FORMATION IN A POROUS MEDIUM SATURATED WITH METHANE AND ICE

Введение

В настоящее время энергетический потенциал природных газогидратов является основным стимулом для их всестороннего изучения. Оценка количества газа, содержащегося в природных гидратах, у разных исследователей колеблется в больших пределах, но все они сходятся в том, что это количество намного превосходит существующие и разведанные запасы газа.

Математическое моделирование образования газогидрата при нагнетании газа в пористую среду, изначально насыщенную газом и льдом, было проведено ранее. Следует отметить, что процесс гидратообразования рассмотрен для пористых сред полу-бесконечной длины в автомодельном приближении. Однако все реальные пласты имеют хотя и достаточную протяженность, но все же ограничены в размерах. Поэтому автомодельные решения оказываются справедливыми только для начальных времен процесса гидратообразования, когда влияние правой границы еще не существенно.

Цели и задачи:

- исследовать процесс образования газогидрата в пористой среде конечной протяженности, изначально насыщенной метаном и льдом;
- рассмотреть случаи гидратообразования на фронтальной поверхности и в протяженной области.

Background

Currently, the energy potential of natural gas hydrates is the main incentive for their comprehensive study. Estimates of the amount of gas contained in natural hydrates vary widely by different researchers, but they all agree that this amount is much higher than the existing and explored gas reserves.

The mathematical modeling of the formation of gas hydrate during gas injection into a porous medium initially saturated with gas and ice was carried out earlier. It should be noted that the process of hydrate formation is considered for porous media of semi-infinite length in a self-similar approximation. However, all real formations have a sufficient length, but are still limited in size. Therefore, self-similar solutions turn out to be valid only for the initial times of the hydrate formation process, when the influence of the right boundary is not yet significant.

Aims and Objectives:

- to investigate the process of gas hydrate formation in a porous medium of finite length, initially saturated with methane and ice;
- to consider the cases of hydrate formation on the frontal surface and in the extended area.

Методы

Математическое моделирование.

Результаты

На основе представленной математической модели рассмотрена задача об образовании газогидрата при нагнетании газа (метана) в пористый пласт конечной длины, изначально насыщенный метаном и льдом. Исследованы случаи, когда гидратообразование происходит как на фронтальной поверхности, так и в протяженной области. Установлено, что часть образовавшегося в протяженной области газогидрата может в дальнейшем диссоциировать, а протяженная область гидратообразования - вырождаться во фронтальную поверхность.

Methods

Math modeling.

Results

On the basis of the presented mathematical model, the problem of gas hydrate formation during gas (methane) injection into a porous layer of finite length, initially saturated with methane and ice, is considered. Cases where hydrate formation occurs both on the frontal surface and in an extended area have been investigated. It has been established that a part of the gas hydrate formed in an extended region can further dissociate, and an extended hydrate formation region can degenerate into a frontal surface.

Ключевые слова: газовые гидраты; фазовый переход; образование и разложение гидрата; задача Стефана; закрытая граница; продувка пласта

Key words: gas hydrates; phase transition; formation and decomposition of hydrate; Stefan problem; closed boundary; reservoir blowdown

Введение

Газовые гидраты представляют собой кристаллические соединения, которые образуются при контакте газа и воды или льда при высоких давлениях и низкой температуре. Изначально практический интерес к изучению газовых гидратов возник в начале XX в. Он был связан с образованием газогидратов в системах транспортировки нефти и газа, где высокие давления в трубопроводе в сочетании с холодными температурами создают идеальную среду для их образования и приводят к серьезным проблемам. Проблемы, связанные с образованием газовых гидратов, стали особенно актуальными в связи с взрывом буровой установки Deep Water Horizon 2010 г. и последующими попытками остановить поток нефти в Мексиканский залив [1].

В настоящее время энергетический потенциал природных газогидратов является основным стимулом для их всестороннего изучения.

Оценка количества газа, содержащегося в природных гидратах, у разных исследователей колеблется в больших пределах, но все они сходятся в том, что это количество намного превосходит существующие и разведанные запасы газа.

Кроме того, применение газовых гидратов при транспортировке и хранении газа также привлекает очень большое внимание [2], поскольку при прочих равных условиях в единице объема гидрата содержится больше газа, чем в свободном состоянии [3]. Так, в 90-е годы XX в. обнаружено, что даже при атмосферном давлении гидраты могут быть относительно стабильными [4].

Математическое моделирование образования газогидрата при нагнетании газа в пористую среду, изначально насыщенную газом и льдом, было проведено в работах [5-7]. Следует отметить, что в этих работах процесс гидратообразования рассматривается для пористых сред полубесконечной длины в автомоделном приближении.

Однако все реальные пласты имеют хотя и достаточную протяженность, но все же ограничены в размерах. Поэтому автомоделные решения оказываются справедливыми только для начальных времен процесса гидратообразования, когда влияние правой границы еще не существенно.

Оценки возможности создания подземного хранилища природного газа в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах проводились в работе [8].

В данной работе исследуется процесс образования газогидрата в пористой среде конечной протяженности, изначально насыщенной метаном и льдом. Рассмотрены случаи гидратообразования на фронтальной поверхности и в протяженной области.

Постановка задачи и алгоритм решения

Рассмотрим в плоскоодномерном приближении пористый пласт длины L , насыщенный в начальный момент времени газом (метаном) и льдом, давление p_0 и температура T_0 которых соответствуют условиям их стабильного существования, т.е. $T_s(p_0) < T_0$, где $T_s(p)$ - равновесная температура, соответствующая давлению p .

Положим, что через левую границу пласта начинает закачиваться такой же газ с температурой T_e и давлением p_e . При этом данные параметры соответствуют условиям стабильного существования газа и гидрата, т.е. $T_e < T_s(p_e)$.

Рассматривая мгновенное снижение температуры на этой границе до значения T_e , будем полагать, что в пласте образуются три области, в которых газ, гидрат и лед находятся в различных состояниях.

В ближней области, примыкающей к левой границе пласта, в порах находятся газ

(метан) и его гидрат, а в дальней, граничащей с правой границей пласта, - газ и лед.

Промежуточная область, разделяющая две вышеуказанные области, содержит в своих порах газ, гидрат и лед, находящиеся в состоянии термодинамического равновесия.

Соответственно возникают две подвижные границы: $x = x(n)$, разделяющая ближнюю и промежуточную области, и $x = x(d)$, разделяющая промежуточную и дальнюю.

При описании процесса тепло- и массопереноса в пористых средах, примем одно-температурную модель. Также будем полагать, что пористость постоянна; скелет пористой среды, гидрат и лед несжимаемы и неподвижны, а газ является калорически совершенным [5, 6]:

$$m, \rho_{sk}, \rho_h, \rho_i = const; v_{sk} = v_h = v_i = 0; p = \rho_g R_g T.$$

Здесь m - пористость;

ρ_j и v_j ($j = sk, h, i$) - соответственно

истинная плотность и скорость j -ой фазы;

p - давление;

T - температура;

R_g - газовая постоянная.

Нижние индексы sk, h, i, g соответствуют параметрам скелета, гидрата, льда и газа.

Будем полагать, что гидрат является двухкомпонентной системой с массовой концентрацией газа G .

Система основных уравнений, включающая в себя уравнения сохранения масс (газа и льда), притока тепла в пренебрежении баротермическим эффектом и законом Дарси при отмеченных выше допущениях, имеет вид [5-7]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(mS_g \rho_g) + \frac{\partial}{\partial x}(mS_g v_g \rho_g) = -mG\rho_h \frac{\partial S_h}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(mS_i \rho_i) = -m(1-G)\rho_h \frac{\partial S_h}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_g c_g mS_g v_g \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + m\rho_h L_h \frac{\partial S_h}{\partial t}, \quad (3)$$

$$mS_g v_g = -\frac{k_g}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (4)$$

Здесь S_j ($j = g, i, h$) - насыщенность пор j -ой фазой ($\sum_j S_j = 1$);

ρc и λ - соответственно удельная объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности системы, которые будем считать постоянными величинами, поскольку определяются, в основном, параметрами скелета.

Зависимость коэффициента проницаемости от исходной газонасыщенности зададим на основе формулы Козени [9]:

$$k_g = k_* \frac{(mS_g)^3}{(1 - mS_g)^2} \approx k_0 S_g^3, \quad k_0 = k_* m^3,$$

где k_0 - абсолютная проницаемость пласта.

В области совместного существования газа, гидрата и льда температура и давление связаны условием фазового равновесия [3]:

$$T = T_0 + T_* \ln \left(\frac{p}{p_{s0}} \right), \quad (5)$$

где T_* и p_{s0} - эмпирические параметры, зависящие от вида газогидрата.

Поскольку в пласте существуют области, в которых газ, гидрат и лед находятся различных состояниях, то необходимо ввести соотношения, следующие из законов сохранения масс (газа и льда) и тепла на подвижных границах фазового перехода:

$$[mS_g \rho_g (v_g - \dot{x}_{(j)}) - mG \rho_h S_h \dot{x}_{(j)}] = 0, \quad [m(S_i \rho_i + G \rho_h S_h) \dot{x}_{(j)}] = 0, \\ \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] = [m \rho_h L_h S_h \dot{x}_{(j)}]. \quad (6)$$

Здесь $[\psi]$ - скачок параметра ψ на границе фазового перехода $x = x_{(j)}$ ($j = n, d$);

$\dot{x}_{(j)}$ - скорость движения данной границы.

Поскольку в исходном состоянии пласт насыщен газом и льдом, то начальные условия примут вид:

$$t = 0: \quad p = p_0, \quad T = T_0 \quad (0 \leq x \leq L). \quad (7)$$

Условия на левой границе пласта представим в виде:

$$t > 0: \quad p = p_e, \quad T = T_e \quad (x = 0). \quad (8)$$

На правой границе пласта будем использовать одно из двух условий, соответствующее непроницаемой

$$t > 0: \quad \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (x = L) \quad (9)$$

или открытой

$$t > 0: \quad p = p_0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (x = L) \quad (10)$$

для потока газа границам.

Уравнения пьезо- и теплопроводности для ближней и дальней областей, следующие из системы (1) и (3), построим с учетом закона Дарси и уравнения состояния газа, причем будем полагать, что слагаемое, учитывающее переменность температуры, мало, если характерные перепады температуры в области фильтрации небольшие:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k_g}{m \mu_g S_g} \frac{\partial}{\partial x} \left(p \frac{\partial p}{\partial x} \right), \quad (11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa^{(T)} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{c_g k_g}{\mu_g \rho c R_g T} \frac{p}{R_g T} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (12)$$

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

Уравнения для нахождения распределений давления и, соответственно, температуры, а также гидратонасыщенности в промежуточной области имеют вид:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k_g}{m\mu_g S_g} \frac{\partial}{\partial x} \left(p \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{\Re T}{\Delta T} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\kappa^{(T)} \Re T}{\Delta T} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{c_g k_g \Re}{\mu_g \rho c} \frac{p}{\Delta T \cdot R_g} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial S_h}{\partial t} = \frac{1}{\Delta T} \left[\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa^{(T)} \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{c_g k_g}{\mu_g \rho c} \frac{p}{R_g T} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad (14)$$

$$\text{где } \Re = \frac{G \rho_h R_g}{1 - S_{i0}}, \quad \Delta T = \frac{m \rho_h L_h}{\rho c}.$$

Будем полагать, что при нагнетании газа в пласт на поверхности $x = x_{(n)}$, разделяющей между собой ближнюю и промежуточную области, происходит скачок гидратонасыщенности от $S_{h(n)}^- = S_{h(1)} > 0$ до $S_{h(n)}^+ > 0$, обусловленный переходом на этой границе части воды в гидратное состояние. Тогда условия (6) можно представить в виде:

$$\frac{k_{g(n)}^+}{\mu_g} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{(n)}^+ - \frac{k_{g(n)}^-}{\mu_g} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{(n)}^- = m \dot{x}_{(n)} \left[S_{g(n)}^- - S_{g(n)}^+ + \frac{\rho_h G (S_{h(n)}^- - S_{h(n)}^+)}{\rho_{g(n)}} \right], \quad (15)$$

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{(n)}^- - \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{(n)}^+ = m \rho_h L_h (S_{h(n)}^- - S_{h(n)}^+) \dot{x}_{(n)}, \quad (16)$$

где $S_{h(1)}$ - значение гидратонасыщенности в ближней области.

На границе $x = x_{(d)}$, разделяющей дальнюю и промежуточную области и на которой заканчивается процесс гидратообразования, условия (6) можно представить в виде:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{(d)}^- = \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{(d)}^+, \quad (17)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{(d)}^- = \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{(d)}^+. \quad (18)$$

Решение задачи (11)-(18) с начальными граничными условиями (7)-(10) осуществлялось на основе метода ловли фронта в узел пространственной сетки [10] с шагом по координате $h = L/n$, где n - число точек разбиения.

Суть данного метода состоит в том, что за неизвестный временной шаг τ , определяемый в ходе решения задачи, ближний фронт проходит по координатной сетке равно на величину h .

Уравнениям (11)-(14), а также условиям (7)-(10) и (15)-(18) ставятся в соответствие неявные дискретные аналоги. При этом на каждом временном шаге очередные приближения распределений давления, температуры и гидратонасыщенности, а также положение дальней границы фазового перехода проводились методом итераций следующим образом.

Из уравнений (11) и (13) с условиями (8), (9) или (10), (15) и (17) находится очередное распределение давления в пласте, а из (5) - «новое» распределение температуры в протяженной области.

По найденным давлению и температуре из неявного аналога (14) находится очередное распределение гидратонасыщенности. При этом положение дальнего фронта будем относить к какому-либо узлу, в котором величина гидратонасыщенности равна нулю с некоторой погрешностью, поскольку, согласно постановке рассматриваемой задачи, на дальней границе процесс гидратообразования заканчивается и значение гидратонасыщенности равно нулю. Распределения темпе-

ратуры в ближней и дальней областях находятся из уравнения температуропроводности (12) совместно с условиями (8), (9) и (18), а уточненное значение временного шага - как среднее геометрическое времен, полученных из дискретных аналогов (15) и (16).

На рисунке 1 для момента времени $t = 3.2$ сут представлены распределения температуры, давления и гидратонасыщенности в случае непроницаемой правой границы при разных значениях давления инъекции.

1 - $p_e = 2,3$ МПа; 2 - $p_e = 2,5$ МПа; 3 - $p_e = 2,6$ МПа

Рисунок 1. Распределение температуры, давления и гидратонасыщенности пласта

Для остальных параметров, характеризующих систему, приняты следующие значения:

$$\begin{aligned} T_e &= 265 \text{ К}, L = 50 \text{ м}, k_0 = 10^{-14} \text{ м}^2, \\ m &= 0.2, G = 0.12, \nu = 0.35, \\ \mu_g &= 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}, \lambda = 2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, \\ L_h &= 1.66 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}, \rho_h = 900 \text{ кг/м}^3, \\ \rho_i &= 900 \text{ кг/м}^3, T_0 = 271 \text{ К}, T^* = 30 \text{ К}, \\ p_0 &= 1.7 \text{ МПа}, p_{s0} = 2.38 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Как следует из рисунка 1, образование гидрата может происходить в трех режимах.

Так, при невысокой интенсивности нагнетания газа (рисунок 1, а) образование гидрата происходит на фронтальной поверхности, которая является частным случаем гидратообразования в протяженной области, когда ее ближняя и дальняя границы совпадают, т.е. при $x(n) = x(d)$.

При нагнетании газа под более высоким давлением (рисунок 1, б) образование гидрата происходит в протяженной области. При этом температура пласта поднимается выше исходной, что связано с высокой интенсивностью фазовых переходов и выделением скрытой теплоты гидратообразования. Увеличение давления нагнетаемого газа приводит к росту температуры пласта, которая, как следует из рисунка 1, в, при $p_e = 2,6$ МПа поднимается выше 273,15 К - температуры плавления льда. Поэтому в этом случае рассмотренная модель с образованием газогидрата из льда дает физически противоречивое решение.

Для устранения термодинамического противоречия необходимо вводить еще одну область, в которой содержатся газ, гидрат и талая вода.

На рисунке 2 представлены распределения температуры, давления и гидратонасыщенности в различные моменты времени для случая непроницаемой правой границы при нагнетании газа под давлением $p_e = 2,5$ МПа. Как следует из рисунка 2, в момент времени $t = 1,3$ сут после начала нагнетания в пласте существуют три области. К моменту времени $t = 6$ сут граница $x = x(d)$,

разделяющая между собой дальнюю и промежуточную области, достигла правой границы пласта. Таким образом, в пласте уже существуют лишь две области: ближняя, насыщенная газом и его гидратом, и дальняя, содержащая лед, газ и гидрат в состоянии термодинамического равновесия. При этом распределения температуры, давления и гидратонасыщенности в дальней области при $t = 6$ сут носят монотонный характер. Поскольку правая граница непроницаема, то с течением времени давление пласте становится постоянным и равным давлению нагнетаемого газа, что обуславливает также постоянство значений температуры и гидратонасыщенности в дальней области.

На рисунке 3 представлены распределения температуры и гидратонасыщенности для случая продувки пласта (открытой правой границы) при $p_e = 2,5$ МПа и $p_0 = 2$ МПа. Остальные параметры соответствуют рисунку 2. В этом случае на правой границе ставится условие (10). При таких параметрах нагнетаемого газа образование газогидрата в начальный момент времени происходит в протяженной области.

Из рисунка 3 следует, что с течением времени дальняя граница $x = x(d)$ движется назад, навстречу ближней границе $x = x(n)$. При этом наблюдается уменьшение значения гидратонасыщенности в протяженной области и незначительное снижение температуры в ней. Таким образом, в зоне трехфазного равновесия происходит частичное разложение ранее образовавшегося гидрата. Это обусловлено конвективным сносом нагретого газа за счет выделившегося при образовании газогидрата на границе $x = x(n)$ тепла при фильтрации в протяженной области. Слияние двух границ означает, что процесс гидратообразования происходит уже на фронтальной поверхности $x = x(n)$. На рисунке 3 такой режим показан для момента времени $t = 1500$ сут.

На рисунке 4, а представлены зависимость координаты ближней границы фазового перехода от времени при параметрах нагнетаемого газа и системы, соответствующих рисунку 3.

1 - $t = 1,3$ сут; 2 - $t = 6$ сут; 3 - $t = 500$ сут

Рисунок 2. Распределение температуры, давления и гидратонасыщенности пласта

1 - $t = 30$ сут; 2 - $t = 280$ сут; 3 - $t = 1500$ сут

Рисунок 3. Распределение температуры и гидратонасыщенности пласта при его продуквке

Рисунок 4. Зависимости координаты ближней границы фазового перехода от времени для случаев: непроницаемой правой границы (1) и продуквки пласта (2) (а), продуквки пласта при $p_0 = 2.0$ МПа (1) и $p_0 = 1.9$ МПа (2) (б)

Как видно из рисунка 4, скорость движения фронта $x = x_{(n)}$ в случае непроницаемой правой границы выше, чем при продувке пласта. Это объясняется тем, что в первом случае достаточно быстро реализуется случай, когда в пласте существуют две области, причем дальняя насыщена газом и гидратом с постоянной гидратонасыщенностью.

В этом случае часть льда уже перешла в гидратное состояние, льдонасыщенность уменьшилась. Во втором случае режим образования гидрата в протяженной области сменяется режимом гидратообразования на фронтальной поверхности. Поэтому количество льда, которое необходимо связать с газом, не изменилось. Зависимости координаты ближней границы фазового перехода от времени при продувке пласта для различных значений начальных давления представлены на рисунке 4, б. Как следует из рисунка, при уменьшении начального давления скорость движения границы фазового перехода снижается. Это объясняется тем, что уменьшение исходного давления приводит к тому, что на плоскости фазовой диаграммы (p, T) точки, характеризующие состояние системы, сильнее отдаляются от равновесной кривой гидратообразования в область существования газа и льда в свободном (несвязанном) состоянии.

На рисунке 5, а представлена зависимость координаты границы фазового перехода от времени для случая открытой правой границы и нагнетания газа под давлением $p_e = 2,3$ МПа. В этом случае образование гидрата в режиме продувки происходит на фронтальной границе. Из рисунка 5 следует, что поверхность фазового перехода движется только до некоторого положения $x_{(n)}^*$, затем ее движение прекращается (происходит остановка). При этом в пласте область $x > x_{(n)}^*$ содержит лишь газ и лед, а область $x < x_{(n)}^*$ - только газ и гидрат. Это объясняется тем, что с момента остановки границы фазового перехода температура пласта становится равной равновесной температуре гидратообразования. При этом равновесная температура, как следует из рисунка 4 б, имеет вид прямой, убывающей в глубь пласта. Поэтому существует такая точка $x = x_{(n)}^*$, в которой равновесная температура гидратообразования совпадает с температурой пласта. При этом в области $x > x_{(n)}^*$ параметры системы будут соответствовать условию стабильного существования газа и льда, а в области $x < x_{(n)}^*$ - газа и гидрата.

Рисунок 5. Зависимости координаты границы фазового перехода от времени при продувке пласта газом (а) и распределение температуры (сплошная) и равновесной температуры (пунктирная) на момент остановки фронта (б)

Таким образом, для гидратации пористой среды без остановки границы фазового перехода необходимо, чтобы температура нагнетаемого газа T_e удовлетворяла условию:

$$T_e < T_0 + T_* \ln \left(\frac{p_0}{p_{s0}} \right) .$$

Вывод

На основе представленной математической модели решена задача об образовании гидрата в пористых пластах конечной длины, изначально содержащих газ и лед.

Показано, что гидратообразование может происходить как в протяженной области, так и на фронтальной поверхности.

Установлено, что образование гидрата в протяженной области при продувке пласта приводит к его диссоциации и вырождению этой области во фронтальную поверхность. При этом, когда температура нагнетаемого газа выше равновесной температуры гидратообразования, соответствующей исходному давлению, при продувке пласта реализуется режим с остановкой границы фазового перехода.

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

Список литературы

1. Giavarini C., Hester K. Gas Hydrates. Immense Energy Potential and Environmental Challenges. New York: Springer, 2011. 189 p.
2. Gudmudsson C., Borrehaug A. Frozen Hydrate for Transport of Natural Gas // Natural Gas Hydrates: Materials of the 2-nd International Conference. Toulouse, France. 1996. P. 415-422.
3. Shagapov V.Sh., Khasanov M.K., Musakaev N.G., Ngoc Hai Duong 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
4. Giavarini C., Maccioni F. Self-Preservation at Low Pressure of Methane Hydrates with Various Gas Contents // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2004. Vol. 43. Issue 20. P. 6616-6621.
5. Khasanov M.K. Investigation of Regimes of Gas Hydrate Formation in a Porous Medium, Partially Saturated with Ice // Thermophysics and Aeromechanics. 2015. Vol. 22. No. 2. P. 245-255. DOI: 10.1134/S0869864315020109.
6. 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.
7. Хасанов М.К., Мусакаев Н.Г. Математическое моделирование процесса образования газогидрата при закачке диоксида углерода в насыщенный метаном и льдом пласт // Криосфера земли. 2016. Т. 20. № 3. С. 63-70. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2016-3(63-70).
8. Бондарев Э.А., Рожин И.И., Попов В.В., Аргунова К.К. Оценка возможности подземного

References

1. Giavarini C., Hester K. Gas Hydrates. Immense Energy Potential and Environmental Challenges. New York, Springer, 2011. 189 p.
2. Gudmudsson C., Borrehaug A. Frozen Hydrate for Transport of Natural Gas. *Materials of the 2-nd International Conference «Natural Gas Hydrates»*. Toulouse, France, 1996, pp. 415-422.
3. Shagapov V.Sh., Khasanov M.K., Musakaev N.G., Ngoc Hai Duong 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
4. Giavarini C., Maccioni F. Self-Preservation at Low Pressure of Methane Hydrates with Various Gas Contents. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2004, Vol. 43, Issue 20, pp. 6616-6621.
5. Khasanov M.K. Investigation of Regimes of Gas Hydrate Formation in a Porous Medium, Partially Saturated with Ice. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, Vol. 22, No. 2, pp. 245-255. DOI: 10.1134/S0869864315020109.
6. Gimaltdinov I.K., Khasanov M.K. Matematicheskaya model' obrazovaniya gazogidrata pri inzhetsii gaza v plast, chastichno nasyshchennyi 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].
7. Khasanov M.K., Musakaev N.G. Matematicheskoe modelirovanie protsesssa obrazovaniya gazogidrata pri zakachke dioksida ugleroda v nasyshchennyi metanom i l'dom plast [Mathematical Modeling of the Process of Gas Hydrate Formation at

хранения гидратов природного газа в зоне много-
летней мерзлоты // Криосфера Земли. 2015. Т.
19. № 4. С. 64-74.

9. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М.
Движение жидкостей и газов в природных пла-
стах. М.: Недра, 1984. 208 с.

10. Васильев В.И., Попов В.В., Тимофее-
ва Т.С. Вычислительные методы в разработке
месторождений нефти и газа. Новосибирск: Изд-
во СО РАН, 2000. 126 с.

the Injection of Carbon Dioxide into the Layer Satu-
rated with Methane and Ice]. *Kriosfera zemli - Earth's
Cryosphere*, 2016, Vol. 20, No. 3, pp. 63-70. DOI:
10.21782/KZ1560-7496-2016-3(63-70). [in Russian].

8. Bondarev E.A., Rozhin I.I., Popov V.V., Ar-
gunova K.K. Otsenka vozmozhnosti podzemnogo
khraneniya gidratov prirodnogo gaza v zone mnogo-
letnei merzloty [Assessment of Possibility of Natural
Gas Hydrates Underground Storage in Permafrost
Regions]. *Kriosfera Zemli - Earth's Cryosphere*, 2015,
Vol. 19, No. 4, pp. 64-74. [in Russian].

9. Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M.
Dvizhenie zhidkosti i gazov v prirodnykh plastakh
[The Movement of Liquids and Gases in Natural
Formations]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 208 p. [in
Russian].

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

Авторы

• Столповский Максим Владимирович, канд.
физ.-мат. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Физика»
Российская Федерация, 450064, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
тел. (347) 243-19-14
e-mail: s_maxim.pmm@mail.ru

• Чиглинцева Ангелина Сергеевна, д-р
физ.-мат. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Физика»
Российская Федерация, 450064, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
тел. (347) 243-19-56
e-mail: changelina@rambler.ru

• Кочанова Екатерина Юрьевна
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Ассистент кафедры вычислительной техники
и инженерной кибернетики
Российская Федерация, 450064, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: moto8728@mail.ru

The Authors

• Stolpovsky Maxim V., Candidate of Physical
and Mathematical Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Physics Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064,
Russian Federation
tel: (347) 243-19-14
e-mail: s_maxim.pmm@mail.ru

• Chiglintseva Angelina S., Doctor Physical
and Mathematical Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Physics Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064,
Russian Federation
tel: (347) 243-19-56
e-mail: changelina@rambler.ru

• Kochanova Ekaterina Yu.
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant of Computer Science and Engineering
Cybernetic Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064,
Russian Federation
e-mail: moto8728@mail.ru