Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. Вып. 6 (134). С. 31-41. ISSN 1998-8443 (print)
Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2021. Issue 6 (134). P. 31-41. ISSN 1998-8443 (print)

Научная статья
УДК 532.546:536.421
doi: 10.17122/ntj-oil-2021-6-31-41

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ПРОДУВКИ ПОРИСТОГО РЕЗЕРВУАРА, ИЗНАЧАЛЬНО НАСЫЩЕННОГО МЕТАНОМ И ЛЬДОМ, СОПРОВОЖДАЕМОГО ГИДРАТООБРАЗОВАНИЕМ

Миляуша Рафаэлевна Давлетшина¹, Ангелина Сергеевна Чиглинцева²

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

¹davletshina@yandex.ru

²changelina@rambler.ru

Автор, ответственный за переписку: Ангелина Сергеевна Чиглинцева,
changelina@rambler.ru

Аннотация. Построена математическая модель для решения задачи об образовании газогидрата при нагнетании газа (метана) в пористый пласт конечной длины, изначально насыщенный метаном и льдом. Исследование показало, что образование гидрата может происходить как в протяженной области, так и на фронтальной поверхности. На основе представленной математической модели установлено, что образование гидрата в протяженной области при продувке пласта приводит к его разложению, что, в свою очередь, вызывает вырождение 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. Результаты исследования имеют практическое значение для прогнозирования появления гидратных «пробок» в газопроводах и методах борьбы с ними.

Ключевые слова: газовые гидраты, фазовый переход, гидратообразование, задача Стефана, открытая граница, продувка пласта

© Давлетшина М. Р., Чиглинцева А. С., 2021

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

Для цитирования: Давлетшина М. Р., Чиглинцева А. С. Особенности процесса продувки пористого резервуара, изначально насыщенного метаном и льдом, сопровождаемого гидратообразованием // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. Вып. 6 (134), С. 31-41. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2021-6-31-41>.

Original article

SPECIFIC FEATURES OF THE POROUS RESERVOIR BLOWING PROCESS INITIALLY SATURATED WITH METHANE AND ICE SUPPORTED BY HYDRATE FORMATION

Milyausha R. Davletshina¹, Angelina S. Chiglintseva²

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

¹davletshina@yandex.ru

²changelina@rambler.ru

Corresponding author: Angelina S. Chiglintseva, changelina@rambler.ru

Abstract. A mathematical model has been built to solve the problem of gas hydrate formation during gas (methane) injection into a porous layer of finite length, initially saturated with methane and ice. The study showed that the formation of hydrate can occur both in the extended area and on the frontal surface. On the basis of the presented mathematical model, it has been established that the formation of hydrate in an extended area during reservoir blowing leads to its decomposition, which, in turn, causes the degeneration of this area into the frontal surface.

In this case, when the temperature of the injected gas is higher than the equilibrium temperature of hydrate formation, which corresponds to the initial pressure, during the blow-down of the formation, the mode is realized with the stop of the phase transition boundary. The results of the study are of practical importance for predicting the appearance of hydrate "plugs" in gas pipelines and methods of dealing with them.

Keywords: gas hydrates, phase transition, formation and decomposition of hydratated Stephen, the closed border, a purge of the reservoir

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: Davletshina M. R., Chiglintseva A. S. Osobennosti protsessa produvki poristogo rezervuara, iznachal'no насыshchennogo metanom i l'dom, soprovozhdayemogo gidratoobrazovaniyem. [Specific Features of the Porous Reservoir Blowing Process Initially Saturated with Methane and Ice Supported by Hydrate Formation]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2021, Issue 6 (134), pp. 31-41. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2021-6-31-41>.

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. Кроме того, применение газовых гидратов при транспортировке и хранении газа также привлекает очень большое внимание [1], поскольку при прочих равных условиях в единице объема гидрата содержится больше газа, чем в свободном состоянии [2]. Так, в 90-е годы XX в. обнаружено, что даже при атмосферном давлении гидраты могут быть относительно стабильными [3].

Математическое моделирование образования газогидрата при нагнетании газа в пористую среду, изначально изначально насыщенную газом и льдом, было проведено в работах [4-6]. Оценки возможности создания подземного хранилища природного газа в гидратном состоянии в подмерзлотных водоносных горизонтах проводились в работе [7]. Некоторые вопросы численного моделирования диссоциации гидрата метана рассмотрены в работах [8-11]. Численное моделирование процесса инъекции в

пористые резервуары конечной протяженности рассмотрены, в частности, в работах [12, 13].

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 ее 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 соответствует 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:

$$m, \rho_{sk}, \rho_h, \rho_i = const;$$

$$v_{sk} = v_h = v_i = 0;$$

$$p = \rho_g R_g T$$

где 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 закон Дарси при отмеченных выше допущениях имеет вид:

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

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

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

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

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 [14]:

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

где k_0 - абсолютная проницаемость пласта

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

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

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:

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

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 условие, соответствующей открытой для потока газа границе:

$$t > 0: \quad p = p_0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (x = L). \quad (9)$$

Уравнения пьезо- и теплопроводности для ближней и дальней областей, следующие из системы (1) и (3), построим с учетом закона Дарси (45) и уравнения состояния газа, причем будем полагать, что слагаемое, учитывающее переменность температуры, мало если характерные перепады температуры в области фильтрации небольшие:

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

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

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:

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

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

$$\text{где } \Re = \frac{G \rho_h R_g}{1 - S_{l0}}, \quad \Delta T = \frac{m \rho_h L_h}{\rho c}.$$

Будем полагать, что при нагнетании газа в пласт на поверхности $x = x_{(n)}$, разделяющей 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:

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

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

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 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 0 с некоторой погрешностью, поскольку, согласно постановке рассматриваемой задачи, на дальней границе процесс гидратообразования заканчивается, и значение гидратонасыщенности равно 0.

Распределения температуры 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 представлены распределения температуры и гидратонасыщенности для случая продувки пласта (открытой правой границы) при $p_e = 2.5$ МПа и $p_0 = 2$ МПа.

Для остальных параметров, характеризующих систему приняты следующие значения:

$$\begin{aligned} T_e &= 265 \text{ K}, \\ L &= 50 \text{ м}, \\ k_0 &= 10^{-14} \text{ м}^2, \\ m &= 0.2, \\ G &= 0.12, \nu = 0.35, \\ \mu_g &= 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}, \\ \lambda &= 2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, \\ L_h &= 1.66 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}, \\ \rho_h &= 900 \text{ кг/м}^3, \\ \rho_i &= 900 \text{ кг/м}^3, \\ T_0 &= 271 \text{ K}, \\ T^* &= 30 \text{ K [6, 15]}. \end{aligned}$$

В этом случае на правой границе ставится условие (9). При таких параметрах нагнетаемого газа образование газогидрата в начальный момент времени происходит в протяженной области. Из рисунка 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.

Рисунок 1. Распределение температуры и гидратонасыщенности пласта при его продувке

Figure 1. Distribution of temperature and hydrate saturation of the formation during its blowing

Слияние двух границ означает, что процесс гидратообразования происходит уже на фронтальной поверхности $x = x_{(n)}$.

На рисунке 1 такой режим показан для момента времени $t = 1500$ сут.

На рисунке 2, а представлены зависимости координаты ближней границы фазового перехода от времени при параметрах нагнетаемого газа и системы, соответствующих рисунку 1.

Как видно из рисунка 2, а, 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 2, 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 3, а представлена зависимость координаты границы фазового перехода от времени для случая открытой правой границы и нагнетании газа под давлением $p_e = 2.3$ МПа. В этом случае образование гидрата в режиме продувки происходит на фронтальной границе.

Рисунок 2. Распределения температуры и гидратонасыщенности пласта при его продувке
Figure 2. Distribution of temperature and hydrate saturation of the formation during its blowing

Рисунок 3. Зависимость координаты границы фазового перехода от времени при продувке пласта газом (а) и распределение температуры (сплошная) и равновесной температуры (пунктирная) на момент остановки фронта (b)
Figure 3. Dependence of the coordinate of the phase transition boundary on time during blowdown reservoir gas (a) and temperature distribution (solid line) and equilibrium temperature (dashed line) at the moment of front stopping (b)

Из рисунка 3 следует, что поверхность фазового перехода движется только до некоторого положения, 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 2, b , имеют вид прямой, убывающей вглубь 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.

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

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

Выводы

В данной работе построена математическая модель для решения задачи образования гидрата. Задача реализована для продувки пласта, содержащего в начальном состоянии гидрат и газ.

Исследование показало, что образование гидрата может происходить как в протяженной области, так и на фронтальной поверхности. На основе представленной математической модели установлено, что образование гидрата в протяженной области при продувке пласта приводит к его разложению, что, в свою очередь, вызывает вырождение 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.

Результаты исследования имеют практическое значение для прогнозирования появления гидратных «пробок» в газопроводах и методах борьбы с ними.

Список источников

1. Gudmudsson C., Borrehaug A. Frozen Hydrate for Transport of Natural Gas // Natural Gas Hydrates: Materials of 2 International Conference. Toulouse, France. 1996. P. 415-422.
2. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. М.: Химия, 1980. 296 с.
3. 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. DOI: 10.1021/ie040038a.
4. Khasanov M.K. Investigation of Regimes of Gas Hydrate Formation in a Porous Medium, Partially Saturated with Ice // Thermophysics and Aerome-

References

1. Gudmudsson C., Borrehaug A. Frozen Hydrate for Transport of Natural Gas. *Materials of 2 International Conference «Natural Gas Hydrates»*. Toulouse, France, 1996, pp. 415-422.
2. Byk S.Sh., Makogon Yu.F., Fomina V.I. *Gazovye gidraty* [Gas Hydrates]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 296 p. [in Russian].
3. 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. DOI: 10.1021/ie040038a.
4. Khasanov M.K. Investigation of Regimes of Gas Hydrate Formation in a Porous Medium, Partially

chanics. 2015. Vol. 22. P. 245-255. DOI: 10.1134/S0869864315020109.

5. 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).

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. Бондарев Э.А., Рожин И.И., Попов В.В., Аргунова К.К. Оценка возможности подземного хранения гидратов природного газа в зоне многолетней мерзлоты // Криосфера Земли. 2015. Т. 19. № 4. С. 64-74.

8. Чиглинтсева А.С., Давлетшина М.Р., Столповский М.В. Влияние параметров пористой среды и источника СВЧ-излучения на динамику разложения газогидрата // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Вып. 6 (128). С. 45-54. DOI: 10.17122/ntj-oil-2020-6-45-54.

9. Davletshina M.R., Stolpovsky M.V., Chiglintseva A.S., Gimaltdinov I.K. Features of Decomposition of Gas Hydrate When Exposed to Microwave Radiation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 919. Article Number 062071. DOI: 10.1088/1757-899X/919/6/062071.

10. Davletshina M.R., Stolpovsky M.V., Chiglintseva A.S. Technologies for Methane Production from Hydrogen Using a Heated Liquid // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 919. Article Number 062070. DOI: 10.1088/1757-899X/919/6/062070.

11. Гималтдинов И.К., Мусакаев Н.Г., Хасанов М.К., Столповский М.В. Особенности процесса разложения газовых гидратов при тепловом и депрессионном воздействиях в пласте конечной протяженности // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2011. № 6. С. 6-13.

12. Гималтдинов И.К., Столповский М.В., Додова М.И. Численное решение задачи об образовании гидрата двуоксида углерода в пористом пласте, изначально насыщенном гидратом метана // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 6. С. 91-98.

13. Столповский М.В., Хасанов М.К., Кулаков П.А. Исследование процесса закачки диоксида углерода в метаногидратные пласты с учетом реальных свойств газов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2018. № 2. С. 101-112.

14. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1984. 208 с.

15. Gimaltdinov I.K., Levina T.M., Stolpov-

Saturated with Ice. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, Vol. 22, pp. 245-255. DOI: 10.1134/S0869864315020109.

5. Khasanov M.K., Musakaev N.G. Matematicheskoe modelirovanie protsessa obrazovaniya gazogidrata pri zakachke dioksida ugleroda v nasyschennyi metanom i l'dom plast [Mathematical Modeling of the Process of Gas Hydrate Formation at the Injection of Carbon Dioxide into the Layer Saturated 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].

6. Gimaltdinov I.K., Khasanov M.K. Matematicheskaya model' obrazovaniya gazogidrata pri inzhektionsii gaza v plast, chastichno nasyschennyi 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. Bondarev E.A., Rozhin I.I., Popov V.V., Argunova K.K. Otsenka vozmozhnosti podzemnogo khraneniya gidratov prirodnogo gaza v zone mnogoletnei 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].

8. Chiglintseva A.S., Davletshina M.R., Stolpovskii M.V. Vliyanie parametrov poristoi sredy i istochnika SVCh-izlucheniya na dinamiku razlozheniya gazogidrata [Influence of Parameters of a Porous Medium and a Microwave Source on the Dynamics of Gas Hydrate Decomposition]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2020, Issue 6 (128), pp. 45-54. DOI: 10.17122/ntj-oil-2020-6-45-54. [in Russian].

9. Davletshina M.R., Stolpovsky M.V., Chiglintseva A.S., Gimaltdinov I.K. Features of Decomposition of Gas Hydrate When Exposed to Microwave Radiation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 919, Article Number 062071. DOI: 10.1088/1757-899X/919/6/062071.

10. Davletshina M.R., Stolpovsky M.V., Chiglintseva A.S. Technologies for Methane Production from Hydrogen Using a Heated Liquid. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 919, Article Number 062070. DOI: 10.1088/1757-899X/919/6/062070.

11. Gimaltdinov I.K., Musakaev N.G., Khasanov M.K., Stolpovskii M.V. Osobennosti protsessa razlozheniya gazovykh gidratov pri teplovom i depressiionnom vozdeistviyakh v plaste konechnoi protyazhennosti [Process Specifics of Dissociation of Gas Hydrates at Thermal and Pressure Influences in Reservoir of Final Extent]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika - Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 2011, No. 7, pp. 6-13. [in Russian].

skii M.V., Solovov D.V. Dynamics of the Localized Pulse in Bubbly Liquid // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. Article Number 022002. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022002.

12. Gimaltdinov I.K., Stolpovskii M.V., Dodova M.I. Chislennoe reshenie zadachi ob obrazovanii gidrata dvoukisi ugleroda v poristom plaste, iznachal'no nasyschennom gidratom metana [Numerical Solution of the Problem of the Formation of Carbon Dioxide Hydrate in a Porous Reservoir, 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].

13. Stolpovskii M.V., Khasanov M.K., Kulakov P.A. Issledovanie protsessa zakachki dioksida ugleroda v metanogidratnye plasty s uchetom real'nykh svoistv gazov [The Study of the Injection Process of Carbon Dioxide in Methanehydrate Layers Taking into Account the Real Properties of Gases]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle - Izvestiya Tulskego Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*, 2018, No. 2, pp. 101-112. [in Russian].

14. 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].

15. Gimaltdinov I.K., Levina T.M., Stolpovskii M.V., Solovov D.V. Dynamics of the Localized Pulse in Bubbly Liquid. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, Vol. 463, Article Number 022002. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022002.

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

• 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

• 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

Статья поступила в редакцию 28.08.2021; одобрена после рецензирования 20.09.2021; принята к публикации 01.11.2021.

The article was submitted 28.08.2021; approved after reviewing 20.09.2021; accepted for publication 01.11.2021.