Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. Вып. 5 (133). С. 33-46. ISSN 1998-8443 (print)
Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2021. Issue 5 (133). P. 33-46. ISSN 1998-8443 (print)

Научная статья

УДК 532.546:536.421

doi: 10.17122/ntj-oil-2021-5-33-46

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОГИДРАТА В ПОРИСТОМ РЕЗЕРВУАРЕ С НЕПРОНИЦАЕМОЙ ГРАНИЦЕЙ, ИЗНАЧАЛЬНО НАСЫЩЕННОМ МЕТАНОМ И ЛЬДОМ

Ангелина Сергеевна Чиглинцева¹, Миляуша Рафаэлевна Давлетшина²

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

¹changelina@rambler.ru

²davletshina@yandex.ru

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

Аннотация. 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.

Ключевые слова: газовые гидраты, фазовый переход, образование и разложение гидрата, задача Стефана, непроницаемая граница

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

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

Для цитирования: Чиглинцева А. С., Давлетшина М. Р. Математическая модель образования газогидрата в пористом резервуаре с непроницаемой границей, изначально насыщенном метаном и льдом // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. Вып. 5 (133), С. 33-46. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2021-5-33-46>.

Original article

A MATHEMATICAL MODEL FOR THE FORMATION OF GAS HYDRATE IN A POROUS RESERVOIR WITH AN IMPRESSIVE BOUNDARY INITIALLY SATURATED WITH METHANE AND ICE

Angelina S. Chiglintseva¹, Milyausha R. Davletshina²

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

¹changelina@rambler.ru

²davletshina@yandex.ru

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

Abstract. On the basis of the presented mathematical model, the problem of the formation of a gas hydrate during the injection of gas (methane) into a porous edge of the bed length, initially saturated with methane and ice, is considered. Cases where hydration 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 the extended hydrate creation region can degenerate the military surface.

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

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. Matematicheskaya model' obrazovaniya gazogidrata v poristom rezervuare s nepronnitsayemoy granitse, iznachal'no nasyshchennom metanom i l'dom. [A Mathematical Model for the Formation of Gas Hydrate in a Porous Reservoir with an Impervious Boundary Initially Saturated with Methane and Ice]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2021, Issue 5 (133), pp. 33-46. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2021-5-33-46>.

Введение

Газовые гидраты представляют собой кристаллические соединения, которые образуются при контакте из газа и воды или льда при высоких давлениях и низкой температуре. Впервые практический интерес к изучению газовых гидратов возник в начале XX в. Он был связан образованием газогидратов в системах транспортировки нефти и газа, где высокие давления в трубопроводе в сочетании с холодными температурами, создают идеальную среду для их образования [1]. Проблемы, связанные с образованием газовых гидратов, стали особенно актуальными в связи с взрывом буровой установки Deep Water Horizon в 2010 г. и последующими попытками остановить поток нефти в Мексиканский залив [2, 3].

Математическое моделирование образования газогидрата при нагнетании газа в пористую среду, изначально изначально насыщенную газом и льдом, было проведено в работах [4-6].

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 [7].

Вопросы разложения гидрата метана рассмотрены в работах [8-10]. Исследования закачки диоксида углерода в пористые пласты рассмотрено в [11, 12].

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 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 однотемпературную модель. Также будем полагать, что пористость постоянна; скелет пористой среды, гидрат и лед несжимаемы и неподвижны, а газ является калорически совершенным [13]:

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

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 закон Дарси при отмененных 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 в различных состояниях, то необходимо ввести соотношения, следующие из законов сохранения масс (газа и льда) и тепла на подвижных границах фазового перехода:

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

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 одно из двух условий, соответствующей непроницаемой для потока газа границе

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

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

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k_g}{m\mu_g S_g} \frac{\partial}{\partial x} \left(p \frac{\partial p}{\partial x} \right), \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa^{(T)} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{c_g k_g}{\mu_g \rho c R_g T} \frac{p}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (11)$$

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:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k_g}{m\mu_g S_g} \frac{\partial}{\partial x} \left(p \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{\Re T}{\Delta T} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\kappa^{(T)} \Re T}{\Delta T} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{c_g k_g \Re}{\mu_g \rho c \Delta T \cdot R_g} \frac{p}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial S_h}{\partial t} = \frac{1}{\Delta T} \left[\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa^{(T)} \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{c_g k_g}{\mu_g \rho c R_g T} \frac{p}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad (13)$$

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

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:

$$\frac{k_{g(n)}^+}{\mu_g} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{(n)}^+ - \frac{k_{g(n)}^-}{\mu_g} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{(n)}^- = m \dot{x}_{(n)} \left[S_{g(n)}^- - S_{g(n)}^+ + \frac{\rho_h G (S_{h(n)}^- - S_{h(n)}^+)}{\rho_{g(n)}} \right], \quad (14)$$

$$\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{(n)}^- - \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{(n)}^+ = m \rho_h L_h (S_{h(n)}^- - S_{h(n)}^+) \dot{x}_{(n)} \quad (15)$$

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:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_{(d)}^{-} = \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_{(d)}^{+}, \quad (16)$$

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

Решение задачи (10)-(17) с начально-граничными условиями (7)-(9) осуществлялось на основе метода ловли фронта в узел пространственной сетки [15] 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 (10)-(13), а также условиям (7)-(9) и (15)-(17) 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 (10) и (12) с условиями (8), (9), (14) и (16) находится очередное распределение давления в пласте, а из (5) - «новое» распределение температуры в протяженной области.

По найденным давлению и температуре из неявного аналога (13) 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 температуры в ближней и дальней областях находятся из уравнения температуропроводности (11) совместно с условиями (8), (9) и (17), а уточненное значение временного шага - как среднее геометрическое времен, полученных из дискретных аналогов (14) и (15).

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.

Для остальных параметров, характеризующих систему приняты следующие значения [6, 16]

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

Рисунок 1. Распределение температуры, давления и гидратонасыщенности пласта:

1 - $p_e = 2.3$ МПа; 2 - $p_e = 2.5$ МПа; 3 - $p_e = 2.6$ МПа

Figure 1. Distribution of temperature, pressure and hydrate saturation of the formation:

1 - $p_e = 2.3$ MPa; 2 - $p_e = 2.5$ MPa; 3 - $p_e = 2.6$ MPa

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 поверхно-

сти, 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, *b*) 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.

Как следует из рисунка 1, *c* увеличение давления нагнетаемого газа приводит к росту температуры пласта, которая 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, *a* представлены зависимости координаты ближней границы фазового перехода от времени при параметрах нагнетаемого газа и системы. Как видно из рисунка, скорость движения фронта $x = x_{(r)}$ в случае непроницаемой правой границы выше, чем в случае открытой границы.

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 перешло 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 3, *b*. 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).

Рисунок 2. Распределение температуры, давления и гидратонасыщенности пласта:

1 - $t = 1.3$ сут; 2 - $t = 6$ сут; 3 - $t = 500$ сут

Figure 2. Distribution of temperature, pressure and hydrate saturation of the formation:

1 - $t = 1.3$ days; 2 - $t = 6$ days; 3 - $t = 500$ days

Рисунок 3. Зависимость координаты ближней границы фазового перехода от времени для случаев: непроницаемой правой границы (1) и проницаемой правой границы (2) (a); проницаемой границы пласта при $p_0 = 2$ МПа (1) и $p_0 = 1.9$ МПа (2) (b)

Figure 3. Dependence of the coordinates of the near boundary of the phase transition on time for the cases: impenetrable right boundary (1) and permeable right boundary (2) (a); permeable formation boundary at $p_0 = 2$ MPa (1) and $p_0 = 1.9$ MPa (2) (b)

Выводы

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 непроницаемой правой границе происходит с более высокой скоростью, чем при открытой границе, где реализуется режим с остановкой границы фазового перехода.

Список источников

1. 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.
2. Giavarini C., Hester K. *Gas Hydrates*. London:

References

1. 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.
2. Giavarini C., Hester K. *Gas Hydrates*. London,

Springer, 2011. 178 p. DOI: 10.1007/978-0-85729-956-7.

3. Gudmudsson C., Borrehaug A. Frozen Hydrate for Transport of Natural Gas // *Natural Gas Hydrates: Proceedings of the 2 International Conference*. Toulouse, France. 1996. P. 415-422.

4. Khasanov M.K. Investigation of Regimes of Gas Hydrate Formation in a Porous Medium, Partially Saturated with Ice // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2015. Vol. 22. Issue 2. 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 инжекции газа в пласт, частично насыщенный льдом // *Прикладная математика и механика*. 2016. № 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. 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.

9. Чиглинцева 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.

10. 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.

11. 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.

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. Гималтдинов И.К., Мусакаев Н.Г., Хасанов М.К., Столповский М.В. Особенности процес-

Springer, 2011. 178 p. DOI: 10.1007/978-0-85729-956-7.

3. Gudmudsson C., Borrehaug A. Frozen Hydrate for Transport of Natural Gas. *Proceedings of the 2 International Conference «Natural Gas Hydrates»*. Toulouse, France, 1996, pp. 415-422.

4. Khasanov M.K. Investigation of Regimes of Gas Hydrate Formation in a Porous Medium, Partially Saturated with Ice. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, Vol. 22, Issue 2, pp. 245-255. DOI: 10.1134/S0869864315020109.

5. Khasanov M.K., Musakaev N.G. Matematicheskoe modelirovanie protsessa obrazovaniya gazogidrata pri zakachke dioksida ugleroda v nasyshchennyi 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 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, 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. 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.

9. 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 nefiti 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].

10. 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.

11. Stolpovskii M.V., Khasanov M.K.,

са разложения газовых гидратов при тепловом и депрессионном воздействиях в пласте конечной протяженности // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2011. № 7. С. 6-13.

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

15. Васильев В.И., Попов В.В., Тимофеева Т.С. Вычислительные методы в разработке месторождений нефти и газа. Новосибирск: Изд-во Сиб. отд-ния Рос. акад. наук, 2000. 127 с.

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

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

12. Gimaltdinov I.K., Stolpovskii M.V., Dodova M.I. Chislennoe reshenie zadachi ob obrazovanii gidrata dvoukisi ugleroda v poristom plaste, iznachal'no насыщенный гидратом метана [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].

13. Gimaltdinov I.K., Musakaev N.G., Khasanov M.K., Stolpovskii M.V. Osobennosti protsessa razlozheniya gazovykh gidratov pri teplovom i depressionnom vozdviizhiyakh 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].

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. Vasilev V.I., Popov V.V., Timofeeva T.S. *Vychislitel'nye metody v razrabotke mestorozhdenii nefti i gaza* [Computational Methods in the Development of Oil and Gas Fields]. Novosibirsk, Izd-vo Sib. otd-niya Ros. akad. nauk Publ., 2000. 127 p. [in Russian].

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

Информация об авторах

• Чиглинцева Ангелина Сергеевна, д-р физ.-мат. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Физика»

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

Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1
e-mail: changelina@rambler.ru

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

• 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

Статья поступила в редакцию 28.06.2021; одобрена после рецензирования 20.08.2021; принята к публикации 01.09.2021.

The article was submitted 28.06.2021; approved after reviewing 20.08.2021; accepted for publication 01.09.2021.