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

ОСОБЕННОСТИ НАГРЕВА ПОРИСТОЙ СРЕДЫ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ГАЗОГИДРАТОВ

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

FEATURES OF POROUS MEDIUM HEATING WHILE GAS HYDRATES FORMATION

Введение

Многие технологические процессы в нефтегазовой отрасли сопровождаются образованием и отложением газовых гидратов как в пласте, так и в системах подземного и наземного оборудования нефтяных и газовых месторождений. При этом процессы гидратообразования ведут к выделению скрытой теплоты гидратообразования, что может приводить к значительному повышению температуры в пористой среде.

Математическая модель образования и разложения газогидратов в пористой среде бесконечной протяженности была рассмотрена ранее. Получено, что в зависимости от начальных и граничных условий образование и разложение газогидрата может происходить как на фронтальной поверхности, так и в протяженной области.

Цели и задачи

Рассмотреть математическую модель образования газогидрата в пористой среде конечной протяженности с формированием протяженной области фазовых переходов.

Методы

Математическое моделирование.

Результаты

Исследовано влияние исходных параметров, а также параметров на границе среды на эволюцию полей температуры в пласте.

Background

Many technological processes in the oil and gas industry are accompanied by the formation and deposition of gas hydrates both in the reservoir and in the systems of underground and surface equipment of oil and gas fields. In this case, the processes of hydrate formation lead to the release of latent heat of hydrate formation, which can lead to a significant increase in temperature in a porous medium.

The mathematical model of the formation and decomposition of gas hydrates in a porous medium of infinite length was considered earlier. It was found that, depending on the initial and boundary conditions, the formation and decomposition of gas hydrate can occur both on the frontal surface and in an extended region.

Aims and Objectives

Consider a mathematical model of the formation of gas hydrate in a porous medium of finite length with the formation of an extended region of phase transitions.

Methods

Math modelling.

Results

The influence of the initial parameters, as well as the parameters at the boundary of the medium, on the evolution of the temperature fields in the reservoir is investigated.

Показано, что нагнетание холодного газа приводит к нагреву пласта, причем тем сильнее, чем выше давление нагнетаемого газа.

It is shown that the injection of cold gas leads to the heating of the formation, and it is the stronger, the higher the pressure of the injected gas.

Ключевые слова: газогидрат; пористая среда; численное моделирование; холодный газ; теплоперенос

Key words: gas hydrate; porous medium; numerical simulation; cold gas; heat transfer

Введение

Многие технологические процессы в нефтегазовой отрасли сопровождаются образованием и отложением газовых гидратов как в пласте, так и в системах подземного и наземного оборудования нефтяных и газовых месторождений. В настоящее время в большинстве случаев гидратообразование носит чаще негативный характер, связанный с аварийными остановками из-за «склероза» установок и с последующими затратами на устранение таких осложнений.

Однако процессы гидратообразования могут иметь и положительный аспект, например, использованы для увеличения емкости подземных резервуаров для хранения углеводородного газа. Такая возможность обусловлена резким ростом массового содержания газа в газогидратном состоянии в единице объема по сравнению со свободным состоянием при той же температуре и давлении [1].

При этом процессы гидратообразования сопровождаются выделением скрытой теплоты гидратообразования, что может приводить к значительному повышению температуры в пористой среде [2].

Этот эффект может быть использован, например, для очистки пористых сред от склеротических бляшек или разжижения углеводородных систем, находящихся изначально в твердом состоянии, для последующего извлечения из недр.

Математическая модель образования и разложения газогидратов в пористой среде бесконечной протяженности рассмотрена в работах [3-9]. В этих работах получены аналитические решения и показано, что в зависимости от начальных и граничных условий образование и разложение газогидрата может происходить как на фронтальной поверхности, так и в протяженной области.

В данной работе рассмотрена математическая модель образования газогидрата в пористой среде конечной протяженности с формированием протяженной области фазовых переходов. Исследовано влияние исходных параметров, а также параметров на границе среды на эволюции полей температуры.

Основные допущения и уравнения

Рассмотрим прямолинейно-параллельную задачу об образовании газогидрата в пористом пласте длины L ($0 \leq x \leq L$) при закачке холодного газа через его левую границу $x = 0$. При этом интенсивность процесса образования газогидрата лимитируется отводом скрытой теплоты гидратообразования.

Для теоретического описания процессов тепломассопереноса в пористой среде при нагнетании газа, сопровождающегося образованием газогидрата, примем следующие допущения: пористость среды постоянна, а ее скелет, гидрат и вода несжимаемы и неподвижны.

Допущение о неподвижности жидкости оправдано тем, что как показывают оценки, скорость фильтрации газа во много раз превосходит скорость фильтрации воды, за исключением случаев, когда водонасыщенность близка к единице. Поэтому в большинстве случаев, когда водонасыщенность пор жидкостью составляет не более половины, допущение о ее неподвижности оправдано.

Кроме того, принимается однотемпературная модель пористой среды, т.е. модель, при которой температура самой среды и насыщающего ее вещества (газа, гидрата и воды) в каждой точке совпадают. При этом гидрат является двухкомпонентной системой с массовой концентрацией газа G (при этом массовая концентрация воды равна $1 - G$), а газ является калорически совершенным.

В рассматриваемом случае, направив ось x вдоль течения газа, *система основных уравнений*, описывающая процессы фильтрации и теплопереноса, сопровождающиеся образованием газогидрата в пористой среде, и представляющая собой законы сохранения масс и энергии, закон Дарси и уравнение состояния совершенного газа, при отмеченных выше допущениях, имеет вид [5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(mS_g\rho_g + mGS_h\rho_h) + \frac{\partial}{\partial x}(mS_g v_g \rho_g) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(mS_l\rho_l + m(1-G)S_h\rho_h) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho c \cdot T) + c_g \rho_g mS_g v_g \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial t}(m\rho_h L_h S_h), \\ mS_g v_g &= -\frac{k_g}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial x}, \\ p &= \rho_g R_g T. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь m - пористость;

ρ_j и S_j ($j = sk, h, l$) - истинные плотности и насыщенности пор фаз j -ой фазы;

v_g , k_g , c_g и μ_g - соответственно скорость, проницаемость, удельная теплоемкость и динамическая вязкость газовой фазы;
 p - давление;

T - температура;

L_h - удельная теплота гидратообразования;

ρc и λ представляют собой удельную объемную теплоемкость и коэффициент теплопроводности системы «пористая среда - газогидрат», которые при отмеченных допущениях можно считать постоянными величинами;

индексы h, l, g относятся к параметрам гидрата, воды и газа соответственно.

Данная система дополняется зависимостью коэффициента проницаемости для газа от газонасыщенности, заданной на основе формулы Козени:

$$k_g = k_0 S_g^3,$$

где k_0 - абсолютная проницаемость пласта.

При образовании газогидрата в пористом пласте возникают зоны, в которых газ, гидрат и вода находятся в различных состояниях.

На поверхностях разрыва между этими зонами, где терпят скачки насыщенности фаз, а также потоки массы и тепла, выполняются следующие из условий баланса массы и тепла:

$$\begin{aligned} [m(\rho_l S_l (v_l - \dot{x}_{(i)}) - \rho_h S_h (1-G)\dot{x}_{(i)})] &= 0, \\ [m(\rho_g S_g (v_g - \dot{x}_{(i)}) - \rho_h S_h G\dot{x}_{(i)})] &= 0, \\ \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right] &= [m\rho_h L_h S_h \dot{x}_{(i)}]. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $[\psi] = \psi^+ - \psi^-$ - скачок параметра ψ на границе $x = x_{(i)}$;

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

Температуру и давление на границе также будем считать непрерывными.

В трехфазной области, где одновременно присутствуют газ, газогидрат и вода и происходит процесс гидратообразования, принимается условие фазового равновесия:

$$T = T_0 + T_* \ln \left(\frac{p}{p_{s0}} \right). \quad (3)$$

Здесь T_0 - исходная температура системы;

p_{s0} - равновесное давление, соответствующее исходной температуре;

T_* - эмпирический параметр, зависящий от вида газогидрата.

Из (3) следует, что

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_*}{p} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_*}{p} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{T_*}{p^2} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2. \quad (4)$$

Пусть пористый пласт протяженности L в исходном состоянии насыщен газом и водой под давлением p_0 и температурой T_0 , удовлетворяющих условиям их свободного существования и одинаковым во всем пласте:

$$p = p_0, \quad T = T_0, \quad S_l = S_{l0} \quad (0 \leq x \leq L, \quad t = 0). \quad (5)$$

Условия на левой границе ($x = 0$), через которую происходит нагнетание газа под давлением p_e и температурой T_e , удовлетворяющие условиям стабильного существования газа и гидрата, можно представить в виде:

$$p = p_e, \quad T = T_e \quad (x = 0, \quad t > 0). \quad (6)$$

На правой границе пласта ($x = L$) поставим условия, моделирующие отсутствие через нее потока тепла и давление, равное начальному:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (x = L, \quad t > 0). \quad (7)$$

Приведение системы уравнений к виду, удобному для численного решения и анализ результатов

Рассмотрим процесс гидратообразования в объемной области. В этом случае выделяются три характерные области: ближняя, где поры заполнены газом и гидратом, промежуточная, где газ, гидрат и вода находятся в равновесии, и дальняя, которая заполнена газом и водой. В промежуточной зоне происходит процесс гидратообразования. Соответственно образуются две подвижные поверхности: между дальней и промежуточной областями, где начинается переход воды в гидрат, и между ближней и промежуточной областями, на которой процесс образования гидрата заканчивается.

Границу, на которой справедливы условия (6) будем называть непроницаемой.

Из системы (1) для ближней и дальней областей уравнения пьезо- и теплопроводности могут быть представлены в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{T} \right) = \frac{k_g}{m \mu_g S_g} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{T} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right), \quad (8)$$

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

Для промежуточной области аналогичные уравнения примут вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{T} \right) = \frac{k_g}{m \mu_g S_g} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{T} \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \Re \frac{\partial S_h}{\partial t} \quad (9)$$

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

$$\text{где } \Re = \frac{G \rho_h R_g}{1 - S_{l0}};$$

$$\Delta T = \frac{m \rho_h L_h}{\rho c};$$

$$\kappa^{(T)} = \frac{\lambda}{\rho c} \quad - \text{коэффициент теплопроводности пласта.}$$

Исключив из системы (9) производную гидратонасыщенности по времени с учетом соотношений (5), получим систему для

нахождения распределений давления (и соответственно температуры) и гидратонасыщенности в протяженной области:

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

$$\frac{\partial S_h}{\partial t} = \frac{1}{\Delta T} \left[\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa^{(T)} \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{c_g k_g}{\mu_g \rho c R_g T} \frac{p}{T} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} \right]. \quad (10)$$

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

Условия баланса масс (для газа и воды) и энергии на этой поверхности, как следует из (2), имеют вид:

$$m S_{g(n)}^- \rho_{g(n)}^- (\nu_{g(n)}^- - \dot{x}_{(n)}) = m S_{g(n)}^+ \rho_{g(n)}^+ (\nu_{g(n)}^+ - \dot{x}_{(n)}) + m (S_{h(n)}^- - S_{h(n)}^+) \rho_h G \dot{x}_{(n)},$$

$$m S_{l(n)}^+ \rho_l \dot{x}_{(n)} = m (S_{h(n)}^- - S_{h(n)}^+) \rho_h (1 - G) \dot{x}_{(n)}, \quad (11)$$

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

Здесь $\dot{x}_{(n)}$ – скорость движения границы $x = x_{(n)}$;

верхние знаки «плюс» и «минус» относятся к параметрам перед и за фронтом соответственно.

Можно показать, что на поверхности $x = x_{(d)}$, разделяющей между собой промежуточную и дальнюю области, значение гидратонасыщенности непрерывно и равно нулю:

$$S_{h(d)}^- = S_{h(d)}^+ = 0.$$

Тогда из (2) соотношения для нахождения давления и температуры на этой границе будут иметь вид:

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

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{(d)}^- = \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{(d)}^+. \quad (12)$$

Система уравнений (8) и (10) с начальными и граничными условиями (5)-(7) и условиями на границах фазовых переходов (11) и

(12) в конечно-разностном виде решается с использованием метод ловли фронтов в узлы пространственной сетки [10].

На рисунке 1 представлены расчетные зависимости при образовании гидрата в протяженной области для случая непроницаемой правой границы при нагнетании газа в модельный пласт длины $L = 2$ м с абсолютной проницаемостью $k_0 = 10^{-14}$ м².

Численные значения на кривых - время, ч

Рисунок 1. Распределение по координате x температуры и гидратонасыщенности при образовании гидрата

Для параметров, характеризующих систему «пористая среда - твердый газогидрат - газ», приняты следующие значения:

$$m = 0,1; G = 0,12; S_{i0} = 0,2;$$

$$\mu_g = 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}; \lambda = 2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$L_h = 5 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}; \rho_h = 900 \text{ кг}/\text{м}^3;$$

$$\rho_l = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3; T_0 = 280 \text{ К};$$

$$T_* = 10 \text{ К}; p_0 = 4 \text{ МПа};$$

$$p_{s0} = 5,5 \text{ МПа};$$

$$c_g = 1560 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Как видно из рисунка 1, нагнетание холодного газа, сопровождающееся образованием гидрата, приводит к нагреву пласта. При этом образование гидрата происходит в два этапа.

На первом, быстром по времени, этапе происходит частичное образование в объемной зоне.

На втором этапе происходит полная гидратация пористой среды.

В результате дальняя подвижная граница достигает правой границы пористого пласта. При этом в нем существуют две области, одна из которых (ближняя) содержит газ и газогидрат, а другая (дальняя) – газ, гидрат и воду в состоянии термодинамического равновесия.

Распределения гидратонасыщенности и температуры в трехфазной зоне со временем становятся однородными.

На рисунке 2 для момента времени $t = 3$ сут представлены распределения температуры и гидратонасыщенности при различных значениях давления нагнетаемого газа.

Из рисунка 2 видно, что при увеличении давления нагнетаемого газа температура в области гидратообразования становится значительно выше начальной температуры пласта. Это обусловлено тем, что давление в пласте значительно превышает равновесное давление, соответствующее исходной температуре T_0 .

Следовательно, подача холодного газа в пласт приводит к его нагреву.

1 - $p_e = 6$ МПа; 2 - $p_e = 7$ МПа; 3 - $p_e = 8$ МПа

Численные значения на кривых - время, ч

Рисунок 2. Распределение температуры и гидратонасыщенности при образовании гидрата для момента времени $t = 3$ сут при различных значениях давления нагнетаемого газа

На рисунке 3 представлена зависимость температуры $T_{(n)}$ на ближней границе со стороны протяженной области от давления нагнетаемого газа в пласт. Линии 1 и 2 соответствуют значениям абсолютной проницаемости пласта $k_0 = 10^{-13}$, $k_0 = 10^{-15}$ м².

1 - $k_0 = 10^{-13}$ м²; 2 - $k_0 = 10^{-15}$ м²

Рисунок 3. Зависимость температуры на ближней границе (со стороны протяженной области) от давления нагнетаемого газа

Из анализа рисунка 3 следует, что с увеличением давления нагнетаемого газа и увеличением проницаемости температура на границе $x = x_{(n)}$ увеличивается. Это обусловлено тем, что равновесная температура гидратообразования увеличивается с ростом давления, а с повышением давления закачиваемого газа и понижением проницаемости пласта величина давления в пласте увеличивается.

Вывод

Проведено численное моделирование процесса образования газогидрата в пористой среде с формированием протяженной области гидратообразования. Показано, что нагнетание холодного газа приводит к нагреву пласта, причем тем сильнее, чем выше давление нагнетаемого газа.

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

Список литературы

1. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. М.: Химия, 1980. 296 с.
2. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992. 235 с.
3. Шагапов В.Ш., Мусакаев Н.Г., Хасанов М.К. Нагнетание газа в пористый резервуар, насыщенный газом и водой // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12. № 4. С. 645-656.
4. Шагапов В.Ш., Хасанов М.К., Мусакаев Н.Г. Образование газогидрата в пористом резервуаре, частично насыщенном водой, при инъекции холодного газа // Прикладная математика и техническая физика. 2008. Т. 49. № 3. С. 462-472.
5. Хасанов М.К., Гималтдинов И.К., Столповский М.В. Особенности образования газогидратов при нагнетании холодного газа в пористую среду, насыщенную газом и водой // Теоретические основы химических технологий. 2010. Т. 44. № 4. С. 442-449.
6. Цыпкин Г.Г. О режимах диссоциации газовых гидратов в высокопроницаемых пластах // Инженерно-физический журнал. 1992. Т. 63. № 6. С. 714-721.
7. Цыпкин Г.Г. Математическая модель диссоциации газовых гидратов, сосуществующих с газом в пластах // Доклады академии наук. 2001. Т. 381. № 1. С. 56-59.
8. Цыпкин Г.Г. О режимах диссоциации газовых гидратов, сосуществующих с газом в природных пластах // Инженерно-физический журнал. 2001. Т. 74. № 5. С. 24-28.
9. Шагапов В.Ш., Насырова Л.А. Нагрев пористой среды, частично заполненной газогидратом, при наличии непроницаемых границ // Теплофизика высоких температур. 1999. Т. 37. № 5. С. 784-789.
10. 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.

References

1. Byk S.Sh., Makogon Yu.F., Fomina V.I. *Gazovye gidraty* [Gas Hydrates]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 296 p. [in Russian].
2. Istomin V.A., Yakushev V.S. *Gazovye gidraty v prirodnnykh usloviyakh* [Natural Gas Hydrates]. Moscow, Nedra Publ., 1992. 235 p. [in Russian].
3. Shagapov V.Sh., Musakaev N.G., Khasanov M.K. Nagnetanie gaza v poristy rezervuar, nasyshchenny gazom i vodoi [Gas Injection into a Porous Reservoir Saturated with Gas and Water]. *Teplofizika i aeromekhanika - Thermophysics and Aeromechanics*, 2005, Vol. 12, No. 4, pp. 645-656. [in Russian].
4. Shagapov V.Sh., Khasanov M.K., Musakaev N.G. Obrazovanie gazogidrata v poristom rezervuare, chastichno nasyshchennom vodoi, pri inzhetskii kholodnogo gaza [Formation of a Gas Hydrate Due to Injection of a Cold Gas into a Porous Reservoir Partly Saturated by Water]. *Prikladnaya matematika i tekhnicheskaya fizika - Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika*, 2008, Vol. 49, No. 3, pp. 462-472. [in Russian].
5. Khasanov M.K., Gimaltdinov I.K., Stolpovskii M.V. Osobennosti obrazovaniya gazogidratov pri nagnetanii kholodnogo gaza v poristuyu sredy, nasyshchennuyu gazom i vodoi [Specific Features of the Formation of Gas Hydrates During the Injection of a Cold Gas into a Porous Medium Saturated with a Gas and Water]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskikh tekhnologii - Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoi Tekhnologii*, 2010, Vol. 44, No. 4, pp. 442-449. [in Russian].
6. Tsypkin G.G. O rezhimakh dissotsiatsii gazovykh gidratov v vysokopronitsaemykh plastakh [On Regimes of Gas Hydrate Dissociation in Highly Permeable Layers]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal - Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, 1992, Vol. 63, No. 6, pp. 714-721. [in Russian].
7. Tsypkin G.G. Matematicheskaya model' dissotsiatsii gazovykh gidratov, sosushchestvuyushchikh s gazom v plastakh [Mathematical Model of Gas Hydrates Dissociation Coexisting with Gas in Strata]. *Doklady akademii nauk - Doklady Akademii Nauk*, 2001, Vol. 381, No. 1, pp. 56-59. [in Russian].
8. Tsypkin G.G. O rezhimakh dissotsiatsii gazovykh gidratov, sosushchestvuyushchikh s gazom v prirodnnykh plastakh [Regimes of Dissociation of Gas Hydrates Coexisting with a Gas in Natural Strata]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal - Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, 2001, Vol. 74, No. 5, pp. 24-28. [in Russian].
9. Shagapov V.Sh., Nasyrova L.A. Nagrev poristoi sredy, chastichno zapolnennoi gazogidratom, pri nalichii nepronitsaemykh granits [Heating a Porous Medium, Partially Filled with Gas Hydrate, in the Presence of Impermeable Boundaries]. *Teplofizika vysokikh temperatur - High Temperature*, 1999, Vol. 37, No. 5, pp. 784-789. [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 Development 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 Cy-
bernetic Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450064,
Russian Federation
e-mail: moto8728@mail.ru