

DOI: 10.7242/1999-6691/2016.9.2.15

УДК 533.1:519.622

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТА В ПЛАСТЕ НАСЫЩЕННОГО СНЕГОМ ПРИ НАГНЕТАНИИ ХОЛОДНОГО ГАЗА

В.Ш. Шагапов^{1,2}, А.С. Чиглинцева^{1,3}, А.А. Русинов³¹Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН, Казань, Российская Федерация²Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН, Уфа, Российская Федерация³Бирский филиал Башкирского государственного университета, Бирск, Российская Федерация

Рассмотрена задача нагнетания холодного газа в пласт, в исходном состоянии насыщенный снегом и газом. При построении математической модели учтено, что нагнетание сопровождается гидратообразованием, и в зависимости от исходного состояния системы «снег + газ» и интенсивности инъекции газа могут возникать следующие характерные зоны в области фильтрации: «газ + гидрат», «газ + гидрат + снег», «газ + снег». С целью выявления особенностей процесса формирования гидрата в равновесном режиме начальные параметры, задающие состояния пласта и газа, выбирались на линии фазового равновесия системы «газ + снег + гидрат». Получено уравнение пьезопроводности в автономных координатах, решение которого сведено к решению двух обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка. Численная реализация проводилась с использованием метода Рунге–Кутты 4-го порядка и метода стрельбы. Построены автономные решения, описывающие распределения основных параметров (полей давления и температуры, насыщенностей фаз) в пласте. Выведено условие, согласно которому существует минимальный нагрев системы «газ + снег + гидрат», обеспечивающий полный переход снега в гидратное состояние. Показано, что возможны режимы как полного образования гидрата в объемной области и на фронтальной поверхности, так и частичного (в зависимости от начального состояния пласта и параметров, определяющих нагнетание газа). Установлено, что чем больше начальная снегонасыщенность пласта, тем интенсивнее протекает процесс формирования гидрата и меньше протяженность прогретой зоны. Выявлено, что существует некоторое характерное значение исходной насыщенности пласта снегом, при котором в зависимости от величины нагрева системы «газ + снег + гидрат» может появиться зона, заполненная только гидратной фазой.

Ключевые слова: газовые гидраты, нагнетание метана в пласт, холодный газ, снегонасыщенный газоносный пласт, равновесный режим, автономное решение, метод стрельбы

MATHEMATICAL MODELING OF HYDRATE FORMATION IN A RESERVOIR SATURATED WITH SNOW BY COLD GAS INJECTION

V.Sh. Shagapov^{1,2}, A.S. Chiglintseva^{1,3} and A.A. Rusinov³¹Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Science Center RAS, Kazan, Russian Federation²Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa, Russian Federation³Birsky Branch of Bashkir State University, Birsk, Russian Federation

This paper considers the problem of injection of cold gas into the reservoir saturated in the initial state with snow and gas, which is accompanied by hydrate formation. The proposed mathematical model assumes that, depending on the initial state of the system “snow + gas” and the intensity of gas injection, different characteristic zones may be observed in the filtering zone “gas + hydrate”, “gas + hydrate + snow”, “gas + snow”. In order to identify the characteristics of hydrate formation in the equilibrium mode, the initial parameters reflecting the reservoir and gas conditions are chosen on the line of phase equilibrium of the system “gas + snow + hydrate”. A diffusivity equation is obtained in self-coordinates, and its solution is reduced to the solution of two ordinary differential equations of the first order. Numerical implementation is carried out using the fourth-order Runge–Kutta method and the shooting method. Similarity solutions describing the distribution of basic parameters (pressure and temperature fields, saturation of phases) in the reservoir are constructed. The condition for minimum heating of a “gas + snow + hydrate” system that provides a complete transition of snow to the hydration state is derived. It is shown that the complete hydrate formation and partial hydrate formation (depending on the initial state of the reservoir and the parameters determining gas injection) modes are possible in the volume region and on the front surface. It is also established that the greater is the initial saturation of the reservoir with snow, the more intensive is the process of hydrate formation and the smaller is the length of the heated zone. Simulations yield a characteristic value for the initial saturation of the reservoir with snow at which, depending on the value of heating the system “gas + hydrate + snow”, there may take place a zone saturated with a hydrate only.

Key words: gas hydrate, injection of methane into the reservoir, cold gas, snow saturated gas-bearing reservoir, equilibrium conditions of gas injection, self-similar solution, shooting method

1. Введение

Газогидраты представляют собой не только сырье для получения углеводородных источников энергии, но и обладают способностью вмещать и удерживать газ. С целью уменьшения общей доли парниковых газов и их безопасного хранения, например, в естественных условиях подземных залежей, можно создавать хранилища, в которых будет законсервирован газ в больших объемах, чем в резервуарах с «чистым» газом [1]. Известен эффект самоконсервации газогидратов, который позволяет хранить газ при отрицательной температуре и небольших (порядка нескольких атмосфер) значениях давлений [2].

Согласно экспериментальным данным появление газогидратов возможно при определенных значениях давления и температуры в пределах зоны устойчивости гидрата [3–5]. Так, в работе [6] построена

математическая модель процесса миграции газовых пузырьков в воде в условиях стабильности гидратов с формированием на пузырьковой поверхности гидратной оболочки. Полученные в работе результаты нашли хорошее согласование с экспериментом.

Важной особенностью гидратов метана является то, что природные термодинамические условия их существования находятся вблизи границ стабильности гидратов [7]. В природе газогидраты могут возникать как в донных отложениях морей и океанов, так и в подземных залежах, в поровом пространстве пород при положительных и отрицательных температурах [8–10]. Это явление исследовалось в работах [11–13], в которых были построены математические модели процесса образования газогидрата в пористом пласте, изначально насыщенном газом и льдом (или водой).

В работе [10] установлено, что накопление газогидрата в поровом пространстве активно протекает не только во влажных пористых средах, но и в породах, частично насыщенных льдом.

В [14, 15] исследованы особенности процесса образования газогидрата в пористом пласте, изначально насыщенном газом и льдом при инъекции газа. Построены решения с фронтальной и протяженной областями фазовых переходов гидрата. Выявлены условия, при которых реализуются различные режимы получения гидрата в пористой среде.

Кроме того, известны работы, посвященные сопровождаемому гидратообразованием процессу нагнетания углекислого газа в пласт, в исходном состоянии насыщенный газом и льдом. В частности, математическая модель такого процесса с образованием гидрата диоксида углерода при инъекции углекислого газа в пласт, насыщенный метаном и льдом, представлена в работе [16]. Выявлены различные режимы процесса образования гидрата диоксида углерода и построены диаграммы их существования.

Публикации [17–19] посвящены математическому моделированию образования гидрата диоксида углерода при его инъекции в истощенное месторождение природного газа, содержащее в свободном состоянии метан и воду. Для условий полного или частичного перехода углекислого газа в гидратное состояние построены критические диаграммы режимов закачки диоксида углерода в пласт.

На сегодняшний день имеется большое число работ с описанием кинетики и механизмов зарождения и роста гидрата. В частности известно, что в зависимости от качества воды, льда и содержания в них примесных частиц, солей, капиллярных добавок, а также от «чистоты» гидратообразующего газа и наличия нано-пузырьков газа возможны различные лимитирующие механизмы, которые обуславливают интенсивность роста гидрата при определенных термобарических условиях [2, 4, 20, 21].

Таким образом, анализ литературных источников показал, что в настоящее время большой практический интерес представляет создание различных технологий консервации газа (метана и диоксида углерода) в газогидратное состояние, поскольку они являются выгодными и более безопасными.

Цель данной работы заключается в математическом моделировании процесса образования гидрата в пласте, насыщенном в исходном состоянии снегом и газом, при нагнетании в него холодного газа (метана).

2. Основные уравнения

Пусть в полубесконечной области ($x \geq 0$) находится снег, насыщенный газом (метаном). Исходная снегонасыщенность и метанонасыщенность, соответственно, равняются S_{i0} и S_{g0} , а давление и температура — p_0 и T_0 . Здесь и в дальнейшем первый индекс означает, что значения параметров отнесены к снегу, газу и гидрату ($j = i, g, h$), а второй индекс (0) соответствует исходному состоянию. Причем для исходного состояния системы «снег + газ» значения температуры и давления были выбраны на кривой фазового равновесия системы «снег + газ + гидрат» ($T_0 = T_s(p_0)$). Поэтому в исходном состоянии снег и газ находятся в равновесии ($T_{i0} = T_{g0} = T_0$), и полагается, что эта равновесная смесь имеет температуру, которая ниже точки плавления льда ($T_0 < T^{(0)}$, $T^{(0)} = 0^\circ \text{C}$). Тогда начальные условия можно записать в виде:

$$T = T_0, \quad p = p_0, \quad (T_0 = T_s(p_0), \quad T_0 < T^{(0)} \quad (t = 0; \quad 0 < x < \infty)). \quad (1)$$

Рассмотрим модельную задачу инъекции холодного газа ($T_g \leq 0^\circ \text{C}$) через границу $x = 0$ под действием давления p_e в равновесном режиме (Рис. 1). Температуру инжектируемого газа T_e будем считать равной температуре равновесного состояния фаз снега, газа и гидрата при данном давлении $T_e = T_s(p_e)$:

$$T = T_e, \quad p = p_e, \quad (T_e = T_s(p_e), \quad p_e > p_0 \quad (t > 0; \quad x = 0)). \quad (2)$$

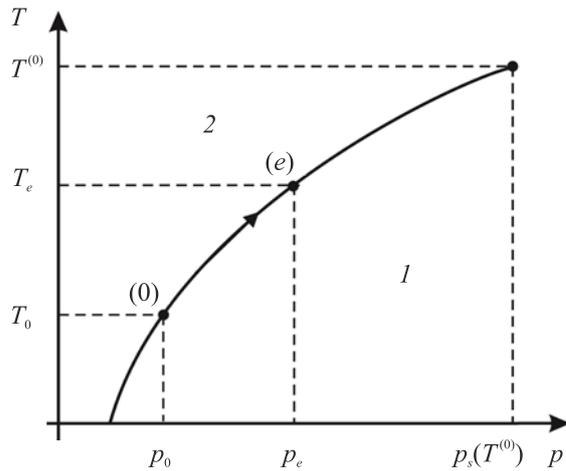


Рис. 1. Условия для равновесного режима закачки холодного газа в пласт; область 1 – «гидрат + газ», область 2 – «снег + газ»

В зависимости от исходного термобарического состояния системы «снег + газ», а также интенсивности нагнетания газа, определяемой значением давления p_0 , могут возникать различные характерные зоны в области фильтрации ($x > 0$). В зоне, где одновременно находятся снег, газ и гидрат, должно выполняться условие фазового равновесия, то есть температура и текущее давление должны быть связаны как [14, 22]

$$T = T_s(p) = T_{(s_0)} + T_* \ln(p/p_{(s_0)}) \quad (3)$$

где $T_{(s_0)}$, $p_{(s_0)}$, T_* — эмпирические параметры, зависящие от вида газогидрата, значения которых принимались равными $T_{(s_0)} = 263 \text{ К}$, $p_{(s_0)} = 1,9 \text{ МПа}$, $T_* = 26 \text{ К}$.

Запишем уравнения масс в зонах течения газа, где помимо снега присутствует гидрат. Конденсированные фазы будем считать неподвижными (скорости снега и гидрата равны нулю: $v_i = v_h = 0$). Тогда уравнение сохранения массы в зоне гидратообразования для газовой фазы будет иметь вид [14, 22, 23]:

$$\frac{\partial(S_g \rho_g)}{\partial t} + \frac{\partial(S_g \rho_g v_g)}{\partial x} = -\rho_h G \frac{\partial S_h}{\partial t}, \quad (4)$$

где G — массовое содержание метана в составе газогидрата.

Аналогично представим уравнение для изменения массы снега:

$$\rho_i \frac{\partial S_i}{\partial t} = -\rho_h (1-G) \frac{\partial S_h}{\partial t}. \quad (5)$$

Фазовые насыщенности должны удовлетворять условию [23]:

$$S_g + S_i + S_h = 1. \quad (6)$$

Снег и гидрат будем считать несжимаемыми, а газ — калорически совершенным:

$$\rho_i, \rho_h = \text{const}, \quad p = \rho_g R_g T. \quad (7)$$

В исходном состоянии (0) гидрат отсутствует ($S_{h0} = 0$, $S_{g0} + S_{i0} = 1$). Тогда из уравнения (5) следует

$$(S_{i0} - S_i) \rho_i = S_h \rho_h (1-G). \quad (8)$$

Отсюда имеем

$$S_h = \frac{\rho_i}{\rho_h (1-G)} (S_{i0} - S_i). \quad (9)$$

Подставляя (9) в (6), получим

$$S_g = 1 - S_i - \frac{\rho_i}{\rho_h (1-G)} (S_{i0} - S_i). \quad (10)$$

Уравнение притока тепла с учетом тепловых эффектов гидратообразования запишем как [14, 22–24]

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} + \rho_g S_g c_g v_g \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho_h l_h \frac{\partial S_h}{\partial t}, \quad (11)$$

$$\rho c = \rho_g S_g c_g + \rho_h S_h c_h + \rho_i S_i c_i, \quad \lambda = \lambda_g S_g + \lambda_h S_h + \lambda_i S_i.$$

Здесь ρc — удельная теплоемкость единицы объема системы «снег + газ + гидрат», c_g — теплоемкость газа при постоянном объеме, λ — коэффициент теплопроводности, l_h — удельная теплота образования гидрата, отнесенная к единице его массы, соответственно, из снега.

Из анализа системы уравнений (4)–(11), аналогично работе [24], следует, что в уравнении (11) слагаемыми, отвечающими за конвективный и кондуктивный перенос тепла, в наиболее интересных для практики случаях можно пренебречь и представить уравнения притока тепла (11) в виде:

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} = \rho_h l_h \frac{\partial S_h}{\partial t}. \quad (12)$$

Для процесса фильтрации газа через скелет из снега и гидрата примем закон Дарси [24–26]:

$$v_g S_g = -\frac{k}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (13)$$

где μ_g — динамическая вязкость газа, k — коэффициент проницаемости скелета.

Уравнение сохранения массы (4), с учетом (3), (12) и (13), а также уравнения состояния газа из (7), приведем к виду:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_g p}{R_g T_s(p)} \right) + \frac{\rho c G}{l_h} \frac{\partial T_s(p)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{R_g T_s(p)} \frac{k}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial x} \right). \quad (14)$$

Входящие сюда насыщенности фаз S_g, S_h, S_i могут быть выражены через давление. Действительно, пренебрегая переменностью объемной теплоемкости ρc всей системы, из (12) имеем

$$S_h = \frac{\rho c}{\rho_h l_h} (T_s(p) - T_0), \quad (p_0 \leq p \leq p_e). \quad (15)$$

Формула (15) определяет гидратонасыщенность как функцию текущего давления в области отрицательных значений температуры ($T < T^{(0)}$).

Соотношения (6) и (9) совместно с выражениями (15) дают однозначные зависимости фазовых насыщенностей от давления. Следовательно, помимо полей давления p , решение уравнения пьезопроводности пласта (14), являющегося нелинейным уравнением параболического типа, позволяет находить также распределения других параметров: температуры, насыщенности фаз и плотности газа.

3. Численный анализ

Задача (14), (15) имеет автомодельное решение. Для этого введем автомодельную переменную

$$\xi = x / \left(2\sqrt{\chi_0^{(p)} t} \right)$$

где $\chi_0^{(p)} = kp_0 / S_{g0} \mu_g$ — коэффициент пьезопроводности. Тогда основное уравнение (14) примет вид:

$$-2\xi f(p) \frac{dp}{d\xi} = \frac{d}{d\xi} \left(\frac{F(p)}{\chi_0^{(p)}} \frac{dp}{d\xi} \right), \quad (16)$$

$$\text{где } f(p) = \frac{S_g(T_s(p) - T_*)}{R_g T_s^2(p)} + \frac{\rho c T_*}{l_h} \left(\frac{G}{p} - \frac{1 - \rho_h(1-G)/\rho_i}{R_g T_s(p)\rho_h} \right), \quad F(p) = \frac{kp}{\mu_g R_g T_s(p)}.$$

Соответственно граничные условия (1) и (2) в автомодельных координатах запишутся как

$$\begin{aligned} T &= T_e, & p &= p_e & (\xi &= 0); \\ T &= T_0, & p &= p_0 & (\xi &= \infty). \end{aligned} \quad (17)$$

Уравнение (16) может быть решено следующим образом. Преобразуем его правую часть так, чтобы получилось дифференциальное уравнение второго порядка относительно давления, сводящееся к двум обыкновенным дифференциальным уравнениям первого порядка:

$$\begin{cases} \frac{dp}{d\xi} = q, \\ \frac{dq}{d\xi} = \frac{-2\xi\chi_0^{(p)} f(p) (dp/d\xi) - \frac{k(T_s(p) - T_*)}{\mu_g R_g T_s^2(p)} (dp/d\xi)^2}{F(p)}. \end{cases} \quad (18)$$

Поскольку на левой границе ($\xi = 0$) значение функции q неизвестно, то для решения системы (18) применяется метод стрельбы, который состоит в многократном решении задачи Коши [27, 28]. При этом сначала произвольно выбирается значение функции $q = q_0$ в точке $\xi = 0$, после чего система (18) решается любым известным численным методом, например, методом Рунге–Кутты 4-го порядка [27, 28]. Затем вычисляется некоторое значение давления при $\xi = \infty$, сравнивается с известным значением p_0 . Если не выполняется некоторая заданная точность ε , корректируется значение q : $q = q_1$. Снова решается задача Коши для нового значения q_1 , получается другое решение для искомого давления при $\xi = \infty$. Реализация задачи подобным образом осуществляется до тех пор, пока давление не примет такое значение, что $|p - p_0| \leq \varepsilon$.

4. Результаты расчетов

Для параметров, определяющих состояние системы, были приняты следующие значения: $\rho_h^0 = 910 \text{ кг/м}^3$; $\rho_i^0 = 900 \text{ кг/м}^3$; $l_h = 1,45 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$; $c_i = 2100 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; $c_h = 2200 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; $c_g = 1650 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; $\mu_g = 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$; $k = 10^{-12} \text{ м}^2$; $R_g = 520 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; $G = 0,12$. Температура и давление пласта равнялись: $T_0 = 193 \text{ К}$ и $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$.

Известно, что процесс гидратообразования может иметь три режима: полное образование гидрата в протяженной области, полное образование гидрата на фронтальной поверхности, частичное образование гидрата [13]. Согласно формуле (15), с учетом (3) и (9), максимально возможное повышение температуры системы «газ + снег + гидрат» в предположении полного перехода снега в гидратное состояние составляет порядка $\Delta T^* \approx 65 \text{ К}$.

Следует отметить, что с точки зрения максимальной консервации газа путем перевода в гидратное состояние наибольший практический интерес представляет появление зоны, которая будет состоять только из фазы гидрата. Из формулы (9), полагая в данной области отсутствие фазы снега ($S_i = 0$) (что достигается при нагреве системы «газ + гидрат» на величину $\Delta T \geq \Delta T^*$), и насыщение только фазой гидрата ($S_h = 1$), получим значение для начальной снегонасыщенности пласта: $S_{i0} \approx 0,9$.

На рисунке 2 приведены распределения давления и температуры, а также гидратонасыщенности и снегонасыщенности пласта при нагнетании в него холодного газа с температурой $T_e = 243 \text{ К}$, которая соответствует равновесному значению давления согласно формуле (3): $p_e = 0,9 \text{ МПа}$ (Рис. 2а, б). Здесь и в дальнейшем числам на кривых соответствуют начальные значения снегонасыщенности: 1 — 0,7; 2 — 0,5; 3 — 0,3. Из рисунка видно, что происходит частичное образование гидрата (Рис. 2в, г). Это связано с тем, что величина нагрева ΔT не превышает максимальное значение ΔT^* , поэтому снег не полностью переходит в гидратное состояние. Таким образом, формируются две характерные зоны: ближняя — одновременно насыщенная фазами газа, снега и гидрата, и дальняя — газом и снегом. Дальняя зона является полубесконечной, и процесс гидратообразования в ней не происходит, поэтому особого интереса данная зона не представляет. На графиках приводятся результаты расчетов только для ближней зоны.

На рисунке 3 представлены аналогичные распределения для режима полного образования гидрата в протяженной области пласта при нагнетании в него холодного газа с температурой $T_e = 263 \text{ К}$, соответствующей, согласно формуле (3), давлению $p_e = 1,8 \text{ МПа}$ (Рис. 3а, б). Поскольку здесь $\Delta T > \Delta T^*$, то, как видно из рисунка 3в, г, наблюдается протяженная область полного перехода снега в гидратное состояние. В этом случае имеются три зоны: ближняя — одновременно насыщенная фазами газа и гидрата, промежуточная — с газом, снегом и гидратом, дальняя — с газом и снегом.

Если величина нагрева ΔT системы «газ + гидрат» оказывается равной максимальному значению ΔT^* , то в этом случае наблюдается режим полного образования гидрата на фронтальной поверхности, что показано на рисунке 4. Рисунок свидетельствует, что с ростом начальной снегонасыщенности пласта интенсивность формирования гидрата увеличивается, вместе с тем сужается нагретая область.

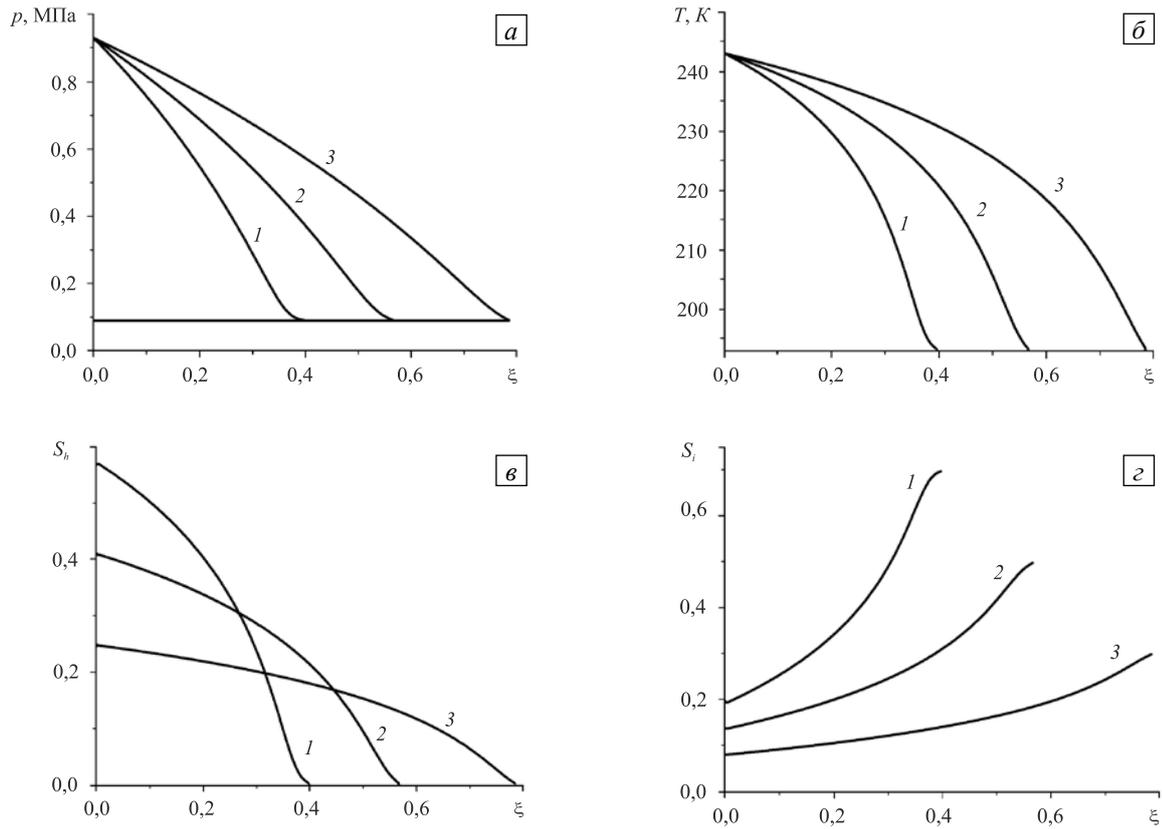


Рис. 2. Режим частичного образования гидрата: распределение в пласте давления (а), температуры (б), гидрато- (в) и снегонасыщенности (г)

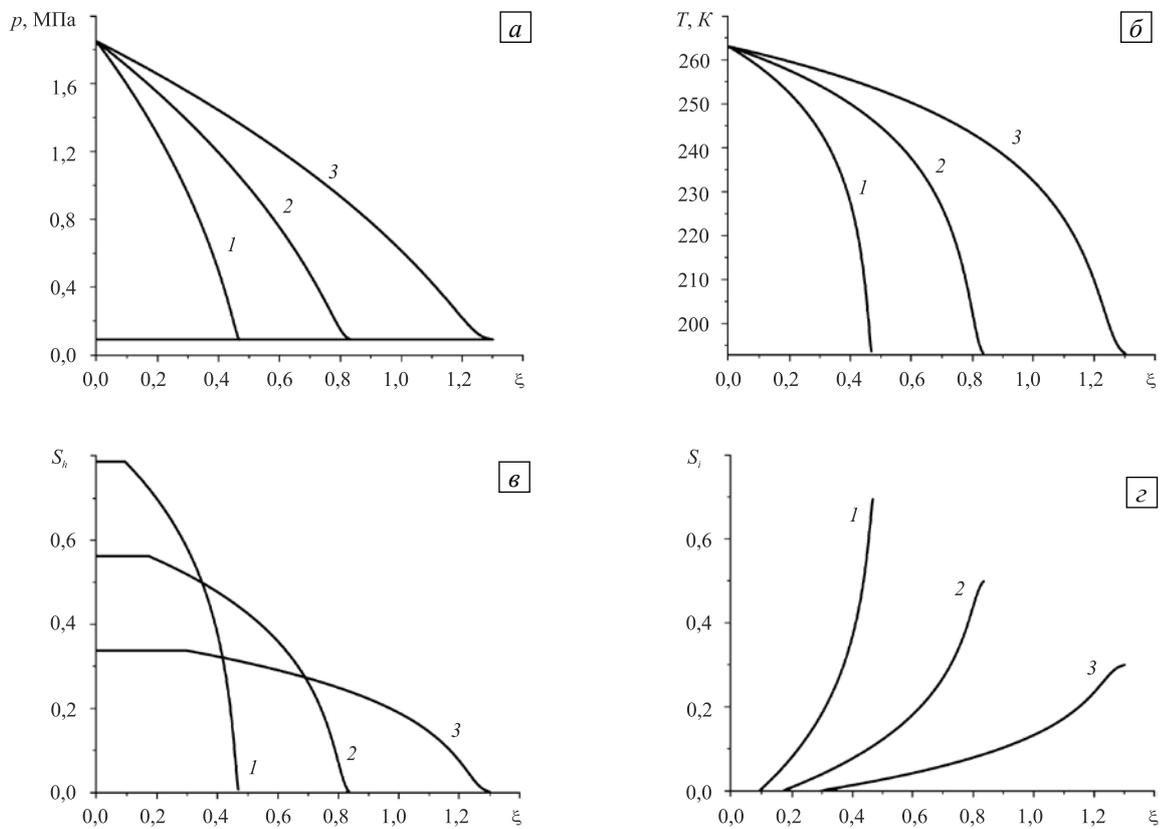


Рис. 3. Режим полного образования гидрата в протяженной области: распределение в пласте давления (а), температуры (б), гидрато- (в) и снегонасыщенности (г)

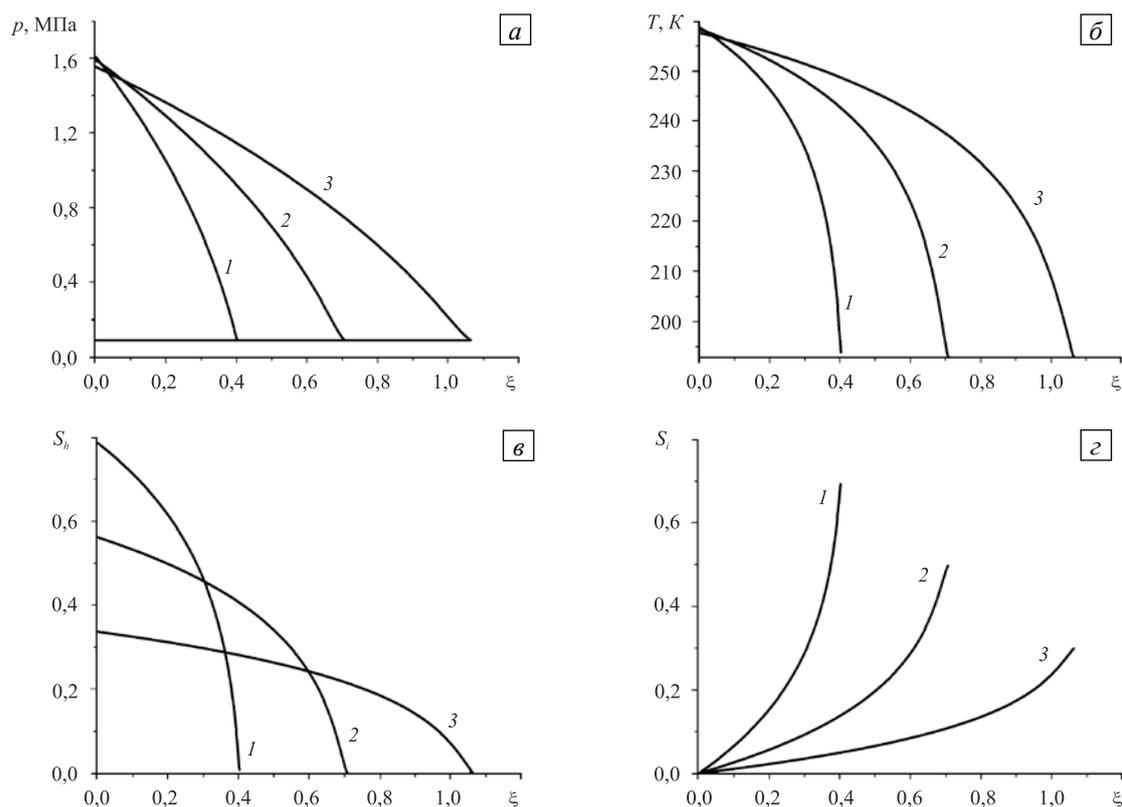


Рис. 4. Режим полного образования гидрата на фронтальной поверхности: распределение в пласте давления (а), температуры (б), гидрато- (в) и снегонасыщенности (г)

5. Выводы

Построена математическая модель процесса нагнетания газа в пласт, в начальном состоянии насыщенный снегом и газом, сопровождаемого гидратообразованием. Построены автомодельные решения, описывающие распределения основных параметров в пласте. Показано, что существуют решения, согласно которым образование газогидрата может происходить в трех различных режимах: полное образование гидрата в объемной области; полное образование гидрата на фронтальной поверхности; частичное образование гидрата.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 15-11-20022).

Литература

1. Jadhawar P., Mohammadi A.H., Yang J., Tohidi B. Subsurface carbon dioxide storage through clathrate hydrate formation // *Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide*. Nato Science Series. – 2006. – Vol. 65. – P. 111-126. DOI
2. Нестеров А.Н. Кинетика и механизмы гидратообразования газов в присутствии поверхностно-активных веществ / Дисс... д-ра хим. наук: 02.00.04. – Тюмень, Институт криосферы Земли СО РАН, 2006. – 280 с.
3. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. – М.: Недра, 1974. – 208 с.
4. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
5. Sloan E.D., Koh C.A. Clathrate hydrates of natural gases. – CRC Press, Taylor & Francis group, 2008. – 119 p.
6. Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Русинов А.А. О миграции пузырьков в условиях образования гидрата // ПМТФ. – 2015. – Т. 56, № 2. – С. 43-52. (English version DOI).
7. Любимова Т.П., Циберкин К.Б. Моделирование диссоциации зерна гидрата метана в пористой матрице // *Вычисл. мех. сплош. сред.* – 2013. – Т. 6, № 1. – С. 119-124. DOI
8. Чувилин Е.М., Козлова Е.В. Исследования формирования мерзлых гидратосодержащих пород // *Криосфера Земли.* – 2005. – Т. IX, № 1. – С. 73-80.
9. Chuvilin E.M., Kozlova E.V., Makhonina N.A., Yakushev V.S. Experimental investigation of gas hydrate and ice formation in methane saturated sediments // *Proc. of the 8th Int. Conf. on Permafrost*, 21-25 July, 2003, Zurich, Switzerland. – P. 145-150.
10. Чувилин Е.М., Гурьева О.М. Экспериментальное изучение образования гидратов CO₂ в поровом пространстве промерзающих и мерзлых пород // *Криосфера Земли.* – 2009. – Т. XIII, № 3. – С. 70-79.
11. Шагапов В.Ш., Хасанов М.К., Мусакаев Н.Г. Образование газогидрата в пористом резервуаре, частично насыщенном водой, при инъекции холодного газа // ПМТФ. – 2008. – Т. 49, № 3. – С. 137-150. (English version DOI).
12. Хасанов М.К., Гималтдинов И.К., Столповский М.В. Особенности образования газогидратов при нагнетании холодного газа в пористую среду, насыщенную газом и водой // *ТОХТ.* – 2010. – Т. 44, № 4. – С. 442-449. (English version DOI).

13. Шагапов В.Ш., Хасанов М.К., Гималтдинов И.К., Столповский М.В. Численное моделирование образования газогидрата в пористой среде конечной протяженности при продувке газом // ПМТФ. – 2011. – Т. 52, № 4. – С. 116-126. (English version DOI).
14. Хасанов М.К. Исследование режимов образования газогидратов в пористой среде, частично насыщенной льдом // Теплофизика и аэромеханика. – 2015. – Т. 22, № 2. – С. 255-266. (English version DOI).
15. Хасанов М.К., Доровская М.С. Математическая модель инъекции холодного газа в пористую среду, частично насыщенную льдом // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9-4. – С. 741-746.
16. Мусакаев Н.Г., Хасанов М.К. Фронтальная схема образования гидрата при нагнетании углекислого газа в насыщенный метаном и льдом пласт // XIV Всероссийский семинар «Динамика многофазных сред», приуроченный к 75-летию академика РАН Фомина В.М., Новосибирск, 2-5 ноября 2015 г. – С. 267-268.
17. Цыпкин Г.Г. Математическая модель инъекции углекислого газа в пласт с образованием гидрата // ДАН. – 2014. – Т. 458, № 4. – С. 422-425. (English version DOI).
18. Цыпкин Г.Г. Образование гидрата углекислого газа при его инъекции в истощенное месторождение углеводородов // МЖГ. – 2014. – № 6. – С. 101-108. (English version DOI).
19. Цыпкин Г.Г. Течения с фазовыми переходами в пористых средах. – М.: Физматлит, 2009. – 232 с.
20. Шагапов В.Ш., Хасанов М.К., Гималтдинов И.К., Столповский М.В. Особенности разложения газовых гидратов в пористых средах при нагнетании теплого газа // Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – Т. 20, № 3. – С. 347-354. (English version DOI).
21. Нугматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – Ч. 1. – 464 с., Ч. 2. – 360 с.
22. Нурисламов О.Р., Шагапов В.Ш. Нагнетание газа во влажную пористую среду с образованием газогидрата // ПММ. – 2009. – Т. 73, № 5. – С. 809-823. (English version DOI).
23. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. – М.: Недра, 1984. – 208 с.
24. Никифоров А.И., Садовников Р.В., Никифоров Г.А. О переносе дисперсных частиц двухфазным фильтрационным потоком // Вычисл. мех. сплош. сред. – 2013. – Т. 6, № 1. – С. 47-53. DOI
25. Durham W., Stern L., Kirby S., Circone S. Rheological comparisons and structural imaging of sI and sII end-member gas hydrates and hydrate/sediment aggregates // Proceedings of the 5th International Conference on Gas Hydrates, Trondheim, Norway, June 2005. – P. 606-613. (URL: <http://web.mit.edu/wbdurham/www1/papers/83-Durham-rheol-ICGH'05.pdf>).
26. Bagherzadeh S.A., Alavi S., Ripmeester J., Englezos P. Formation of methane nano-bubbles during hydrate decomposition and their effect on hydrate growth // J. Chem. Phys. – 2015. – Vol. 142. – 214701. DOI
27. Бахвалов Н.С. Численные методы (анализ, алгебра, обыкновенные дифференциальные уравнения). – М.: Наука, 1975. – 632 с.
28. Вержбицкий В.М. Численные методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения): Учеб. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2001. – 382 с.

References

1. Jadhawar P., Mohammadi A.H., Yang J., Tohidi B. Subsurface carbon dioxide storage through clathrate hydrate formation. *Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide*, Nato Science Series, 2006, vol. 65. Pp. 111-126. DOI
2. Nesterov A.N. *Kinetika i mekhanizmy gidratoobrazovaniya gazov v prisutstvi poverkhnostno-aktivnykh veshchestv* [Kinetics and mechanisms of gas hydrate formation in the presence of surfactants]. Doctoral Dissertation, Tyumen, Earth Cryosphere Institute SB RAS, 2006. 280 p.
3. Makogon Yu.F. *Gidraty prirodnykh gazov* [Hydrates of natural gases]. Moscow: Nedra, 1974. 208 p.
4. Istomin V.A., Yakushev V.S. *Gazovye gidraty v prirodnykh usloviyakh* [Gas hydrates under natural conditions]. Moscow: Nedra, 1992. 236 p.
5. Sloan E.D., Koh C.A. *Clathrate hydrates of natural gases*. CRC Press, Taylor & Francis group, 2008. 119 p.
6. Shagapov V.Sh., Chiglintseva A.S., Rusinov A.A. Bubble migration during hydrate formation. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2015, vol. 56, no. 2, pp. 202-210. DOI
7. Lyubimova T.P Tsiberkin K.B. Simulation of methane hydrate grain dissociation within a porous matrix. *Vychisl. mekh. splosh. sred – Computational Continuum Mechanics*, 2013, vol. 6, no. 1, pp. 119-124. DOI
8. Chuvilin E.M., Kozlova E.V. Issledovaniya formirovaniya merzlykh gidratosoderzhashchikh porod [Investigation of formation of frozen hydrator rocks]. *Kriosfera Zemli – Earth's Cryosphere*, 2005, vol. IX, no. 1, pp. 73-80.
9. Chuvilin E.M., Kozlova E.V., Makhonina N.A., Yakushev V.S. Experimental investigation of gas hydrate and ice formation in methane saturated sediments. *Proc. of the 8th Int. Conf. on Permafrost, 21-25 July, 2003, Zurich, Switzerland*. Pp. 145-150.
10. Chuvilin E.M., Gur'eva O.M. Eksperimental'noe izuchenie obrazovaniya gidratov CO₂ v porovom prostranstve promerzayushchikh i merzlykh porod [Experimental study of formation of CO₂ hydrates in the porous media of freezing and permafrost rocks]. *Kriosfera Zemli – Earth's Cryosphere*, 2009, vol. XIII, no. 3, pp. 70-79.
11. Shagapov V.Sh., Khasanov M.K., Musakaev N.G. Formation of a gas hydrate due to injection of a cold gas into a porous reservoir partly saturated by water. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2008, vol. 49, no. 3, pp. 462-472. DOI
12. Khasanov M.K., Gimaltdinov I.K., Stolpovsky M.V. 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. *Theor. Found. Chem. Eng.*, 2010, vol. 44, no. 4, pp. 424-431. DOI
13. Shagapov V.Sh., Khasanov M.K., Gimaltdinov I.K., Stolpovskii M.V. Numerical modeling of formation of a gas hydrate in a finite-length porous bed purged by a gas. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2011, vol. 52, no. 4, pp. 599-607. DOI
14. 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

15. Khasanov M.K., Dorovskaya M.S. Mathematical model of cold gas injection into the porous medium partially saturated with ice. *Fundamentalnye issledovaniya – Fundamental research*, 2014, no. 9-4, pp. 741-746.
16. Musakaev N.G., Khasanov M.K. XIV All-Russian seminar “Dynamics of Multiphase Media” dedicated to the 75th anniversary of Academician Fomin V.M., Novosibirsk, 2-5 November 2015, pp. 267-268.
17. Tsyppkin G.G. A mathematical model of carbon dioxide flooding with hydrate formation. *Doklady Physics*, 2014, vol. 59, no. 10, pp. 463-466. DOI
18. Tsyppkin G.G. Formation of carbon dioxide hydrate at the injection of carbon dioxide into a depleted hydrocarbon field. *Fluid Dynamics*, 2014, vol. 49, no. 6, pp. 789-795. DOI
19. Tsyppkin G.G. *Techeniya s fazovymi perekhodami v poristykh sredakh* [Flows with phase transitions in porous media]. Moscow: Fizmatlit, 2009. 232 p.
20. Shagapov V.Sh., Khasanov M.K., Gimaltidinov I.K., Stolpovsky M.V. The features of gas hydrate dissociation in porous media at warm gas injection. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2013, vol. 20, no. 3, pp. 339-346. DOI
21. Nigmatulin R.I. *Dynamics of multiphase media*. Hemisphere, N.Y., 1990. Vol. 1, 532 p., vol. 2, 388 p.
22. Nurislamov O.R., Shagapov V.Sh. Gas injection into a moist porous medium with the formation of a gas hydrate. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2009, vol. 73, no. 5, pp. 581-591. DOI
23. Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M. *Dvizhenie zhidkostej i gazov v prirodnykh plastakh* [The motion of fluids and gases in natural strata]. Moscow: Nedra, 1984. 208 p.
24. Nikiforov A.I., Sadovnikov R.V., Nikiforov G.A. About transport of dispersed particles by a two-phase filtration flow. *Vychisl. mekh. splosh. sred – Computational Continuum Mechanics*, 2013, vol. 6, no 1, pp. 47-53. DOI
25. Durham W., Stern L., Kirby S., Circone S. Rheological comparisons and structural imaging of sI and sII end-member gas hydrates and hydrate/sediment aggregates. *Proceedings of the 5th International Conference on Gas Hydrates, Trondheim, Norway, June 2005*, pp. 606-613. (URL: <http://web.mit.edu/wbdurham/www1/papers/83-Durham-rheol-ICGH'05.pdf>).
26. Bagherzadeh S.A., Alavi S., Ripmeester J., Englezos P. Formation of methane nano-bubbles during hydrate decomposition and their effect on hydrate growth. *J. Chem. Phys.*, 2015, vol. 142, 214701. DOI
27. Bakhvalov N.S. *Chislennyye metody (analiz, algebra, obyknovennyye differentsial'nyye uravneniya)* [Numerical methods (analysis, algebra, ordinary differential equations)]. Moscow: Nauka, 1975. 632 p.
28. Verzhbitsky V.M. *Chislennyye metody (matematicheskij analiz i obyknovennyye differentsial'nyye uravneniya)* [Numerical methods (mathematical analysis and ordinary differential equations)]. Moscow: Vysshaya shkola, 2001. 382 p.

Поступила в редакцию 09.02.2016; опубликована в электронном виде 30.06.2016

Сведения об авторах

Шагапов Владислав Шайхулагамович, академик АН Республики Башкортостан, дфмн, проф., гнс, Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН (ИММ КазНЦ РАН), 420111, Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31; e-mail: shagapov@rambler.ru

Чиглинцева Ангелина Сергеевна, кфмн, доц., Бирский Филиал Башкирского государственного университета (БФ БашГУ), 452453, Бирск, ул. Интернациональная, д. 10; e-mail: changelina@rambler.ru

Русинов Алексей Александрович, кфмн, асс., БФ БашГУ; e-mail: irtysh2009@mail.ru