

УДК 536.422:536.244

DOI 10.17223/19988621/41/10

В.Ш. Шагапов, А.С. Чиглинцева, А.А. Русинов**ЗАДАЧА О НАГНЕТАНИИ ХОЛОДНОГО ГАЗА В ПЛАСТ,
НАСЫЩЕННЫЙ СНЕГОМ И ГАЗОМ,
СОПРОВОЖДАЕМОМ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЕМ¹**

Построена математическая модель нагнетания холодного газа в пласт, в исходном состоянии насыщенный снегом и газом, сопровождаемого гидратообразованием. Получено условие, при котором существует минимальный нагрев системы «газ+снег+гидрат», обеспечивающий полный переход снега в гидратное состояние. Установлено, что в зависимости от начального состояния пласта и параметров, определяющих нагнетание газа, возможны режимы полного образования гидрата в объемной области и на фронтальной поверхности, а также частичного образования гидрата. Выявлено, что с ростом начальной снегонасыщенности пласта, процесс образования гидрата происходит интенсивнее, в связи с чем протяженность прогретой зоны уменьшается.

Ключевые слова: *газогидрат, холодный газ, нагнетание, пласт, снег, равновесный режим, автомодельное решение, полное и частичное образование гидрата, объемная область, фронтальная поверхность, нагрев.*

Газогидраты представляют собой сырье не только для получения углеводородных источников энергии, но также являются хранилищем для газа. С целью уменьшения общей доли парниковых газов и их безопасного хранения, например в естественных условиях в подземных залежах, можно создавать хранилища, в которых будет законсервирован газ достаточно больших объемов, чем в резервуарах с «чистым» газом [1]. Так, известен эффект самоконсервации газогидратов, который позволяет хранить газ при отрицательной температуре и небольших значениях давлений порядка нескольких атмосфер [2].

Согласно экспериментальным данным, образование газогидратов возможно при определенных значениях давления и температуры в пределах зоны устойчивости гидрата [3–5]. Так, авторами [6, 7] построена математическая модель процесса миграции газовых пузырьков в воде в условиях стабильности гидратов, сопровождаемого образованием на их поверхности гидратной оболочки. Полученные в работах результаты нашли хорошее согласование с экспериментальными данными.

Важной особенностью гидратов метана является то, что природные термодинамические условия их существования находятся вблизи границ стабильности гидратов [8]. Так, в природных условиях газогидраты могут образовываться как в донных отложениях морей и океанов, так и в подземных залежах в поровом пространстве пород при положительных и отрицательных температурах [9–11]. Данное явление было рассмотрено в работах [12–14], в которых были представлены математические модели процесса образования газогидрата в пористом пласте, изначально насыщенном газом и льдом (или водой).

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-11-20022).

Установлено [11], что накопление газогидрата в поровом пространстве активно протекает не только во влажных пористых средах, но и в породах, частично насыщенных льдом.

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

Таким образом, анализ работ показал, что в настоящее время большой практический интерес представляет создание различных технологий консервации газа в газогидратное состояние, поскольку оно является выгодным и более безопасным.

Целью данной работы является математическое моделирование процесса образования гидрата в пласте, в исходном состоянии насыщенном снегом и газом при нагнетании холодного газа.

Постановка задачи и основные уравнения

Пусть в полубесконечной области ($x \geq 0$) находится снег, насыщенный газом (метаном). Исходная снегонасыщенность и газонасыщенность соответственно равны S_{i0} и S_{g0} , а давление и температура равны p_0 и T_0 . Здесь и в дальнейшем, первый индекс внизу $j = i, g, h$ означает, что значения параметров отнесены к снегу, газу и гидрату, а второй индекс (0) соответствует исходному состоянию. Причем для исходного состояния температура системы «снег+метан» выше равновесной температуры фазовых переходов $T_s(p_0)$ для системы «снег + метан + гидрат» ($T_0 > T_s(p_0)$). Вследствие этого, в исходном состоянии снег и метан находятся в равновесном состоянии ($T_{i0} = T_{g0} = T_0$).

Рассмотрим модельную задачу об инъекции холодного газа ($T_{ge} \leq 0^\circ\text{C}$) через границу $x = 0$ под давлением p_e .

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, т.е. температура и текущее значение давления связаны [16, 17] как

$$T_s(p) = T_* + T_* \ln(p/p_*), \quad (1)$$

где T , T_* , p_* – эмпирические параметры, зависящие от вида газогидрата.

Запишем уравнения масс в зонах течения газа, где помимо снега находится гидрат. Конденсированные фазы будем считать неподвижными. Тогда уравнение сохранения массы в зоне гидратообразования для газовой фазы [15–18] запишется как

$$\frac{\partial(S_g \rho_g)}{\partial t} + \frac{\partial(S_g \rho_g v_g)}{\partial x} = -\rho_h G \frac{\partial S_h}{\partial t}, \quad (2)$$

где G – массовое содержание метана в составе газогидрата, v_g – скорость фильтрации газа.

Аналогично запишем уравнение для изменения массы снега

$$\rho_i \frac{\partial S_i}{\partial t} = -\rho_h (1-G) \frac{\partial S_h}{\partial t}. \quad (3)$$

Фазовые насыщенности должны удовлетворять условию [16]

$$S_g + S_i + S_h = 1. \quad (4)$$

Снег и гидрат будем считать несжимаемыми, а газ – калорически совершенным

$$\rho_i, \rho_h = \text{const}, \quad p = \rho_g R_g T. \quad (5)$$

В исходном состоянии (0) гидрат отсутствует ($S_{h0} = 0$, $S_{g0} + S_{i0} = 1$). Тогда из уравнения (3) следует

$$(S_{i0} - S_i) \rho_i = S_h \rho_h (1-G). \quad (6)$$

Отсюда имеем

$$S_h = \frac{\rho_i}{\rho_h (1-G)} (S_{i0} - S_i). \quad (7)$$

Подставляя (7) в (4), получим

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

Уравнение притока тепла с учетом тепловых эффектов гидратообразования запишется как [15–19]

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} + \rho_g S_g c_g v_g \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho_h l_h \frac{\partial S_h}{\partial t} \quad (9)$$

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

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 на единицу его массы.

Начальные и граничные условия

Будем полагать, что в исходном состоянии равновесная смесь ($T_{g0} = T_{i0} = T_0$)

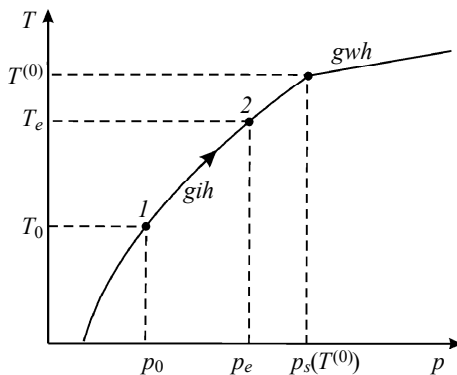


Рис. 1. Условия образования гидрата
Fig. 1. Conditions of hydrate formation

находится ниже точки плавления льда ($T_0 < T^{(0)}$, $T^{(0)} = 0^\circ \text{C}$), что проиллюстрировано на рис. 1. Рассмотрим случай, когда начальная температура T_0 равна значению температуры $T_s(p_0)$ фазового равновесия системы «газ+снег+гидрат» для исходного давления p_0 ($T_0 = T_s(p_0)$) (точка 1).

Пусть газ через границу ($x = 0$) закачивается под давлением p_e , причем значение температуры закачиваемого газа лежит на кривой фазового равновесия для системы «газ+снег+гидрат» (точка 2).

Эти условия могут быть записаны как

$$\begin{aligned} T &= T_0, \quad p = p_0, \quad (T_0 = T_s(p_0)), \quad (t = 0, 0 < x < \infty), \\ T &= T_e, \quad p = p_e, \quad (T_e = T_s(p_e), p_e > p_0), \quad (t > 0, x = 0). \end{aligned} \quad (10)$$

Из анализа системы уравнений (2) – (9), аналогично работам [17–19], следует, что в уравнении (9), слагаемыми, отвечающими за конвективный и кондуктивный перенос тепла, в наиболее интересных для практики случаях, можно пренебречь и уравнения притока тепла (9) можно записать в виде

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} = \rho_h l_h \frac{\partial S_h}{\partial t} \quad (11)$$

Для процесса фильтрации газа через скелет из снега и гидрата примем закон Дарси [17–19] в виде

$$v_g S_g = -\frac{k}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (12)$$

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

Уравнение сохранения массы (2) с учетом (1), (11) и (12), а также уравнения состояния газа из (5) можно привести к виду

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_g p}{R_g T_s(p)} \right) + \frac{\rho c G}{l_h} \frac{\partial T_s(p)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{R_g T_s(p)} \frac{k}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial x} \right). \quad (13)$$

Входящие сюда насыщенности фаз S_g, S_h, S_i могут быть выражены через давление. Действительно, пренебрегая переменностью объемной теплоемкости ρc всей системы, из (11) имеем

$$S_h = \frac{\rho c}{\rho_h l_h} (T_s(p) - T_0) \quad (p_0 \leq p \leq p_s(T^{(0)})). \quad (14)$$

Решение уравнения (13), являющегося нелинейным уравнением параболического типа, полностью позволяет определить поля давления и температуры, а также насыщенности фаз.

Данная задача имеет автомодельное решение. Для этого введем автомодельную переменную

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

где $\chi_0^{(p)} = k p_0 / S_{g0} \mu_g$ – коэффициент пьезопроводности.

Тогда основное уравнение пьезопроводности (13) можно привести к виду

$$-2\xi f(p) \frac{dp}{d\xi} = \frac{d}{d\xi} \left(\frac{F(p)}{\chi_0^{(p)}} \frac{dp}{d\xi} \right), \quad (15)$$

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

Соответственно граничные условия (10) в автомодельных координатах запишутся как

$$\begin{aligned} T &= T_e, \quad p = p_e \quad (\xi = 0), \\ T &= T_0, \quad p = p_0 \quad (\xi = \infty). \end{aligned} \quad (16)$$

Результаты расчетов

Для параметров, определяющих состояние системы, были приняты следующие значения:

$$\begin{aligned} \rho_h^0 &= 910 \text{ кг/м}^3, \rho_i^0 = 900 \text{ кг/м}^3, l_h = 1.45 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}, \\ c_i &= 2100 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}, c_h = 2200 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}, c_g = 1650 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}, \\ \mu_g &= 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}, k = 10^{-12} \text{ м}^2, R_g = 520 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}, G = 0.12. \end{aligned}$$

Температура и давление пласта принимались соответственно равными $T_0 = 203 \text{ K}$ и $p_0 = 0.1 \text{ МПа}$. Начальное значение снегонасыщенности принималось равным 0.7 и 0.3. Числа на кривых соответствуют 1 – 0.7, 2 – 0.3.

Согласно формуле (15) с учетом (1) и (7), минимальный нагрев системы «газ + снег + гидрат», полагая, что снег полностью переходит в гидратное состояние, составляет порядка $\Delta T^* \approx 65 \text{ K}$.

На рис. 2 приведены распределения давления и температуры, а также гидратонасыщенности, снегонасыщенности и газонасыщенности (штриховая линия) пласта при нагнетании холодного газа с температурой $T_e = 250 \text{ K}$, которое соответствует равновесному значению давления согласно формуле (1) $p_e = 1.2 \text{ МПа}$ (рис. 2, а, б). Из графика видно, что происходит частичное образование гидрата (рис. 2, в, з). Поскольку в этом случае величина нагрева ΔT меньше минимального значения ΔT^* , то снег не полностью переходит в гидратное состояние.

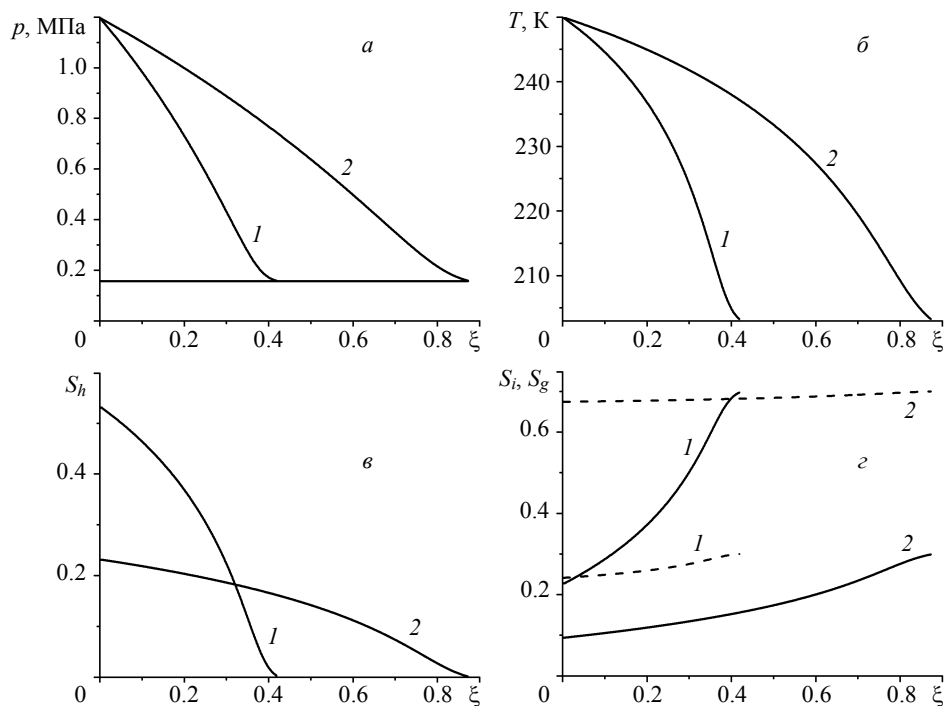


Рис. 2. Распределение давления в пласте (а), температуры пласта (б), гидрато- (в), снего- и газонасыщенности (з) в случае частичного образования гидрата

Fig. 2. Pressure distribution in the reservoir (а), temperature of the reservoir (б), hydrate saturation (в), snow and gas saturation in case of partial hydrate formation (з)

На рис. 3 приведены аналогичные распределения для случая полного образования гидрата в протяженной области при нагнетании газа с температурой $T_e = 270$ К, соответствующее давление согласно формуле (1) $p_e = 2.3$ МПа (рис. 3, а, б). Поскольку здесь $\Delta T > \Delta T^*$, то, как видно из рис. 3, в, з, образуется протяженная зона полного перехода снега в гидратное состояние. В этом случае образуются три зоны: ближняя – одновременно насыщенная фазами газа и гидрата, промежуточная – газом, снегом и гидратом, дальняя – газом и снегом.

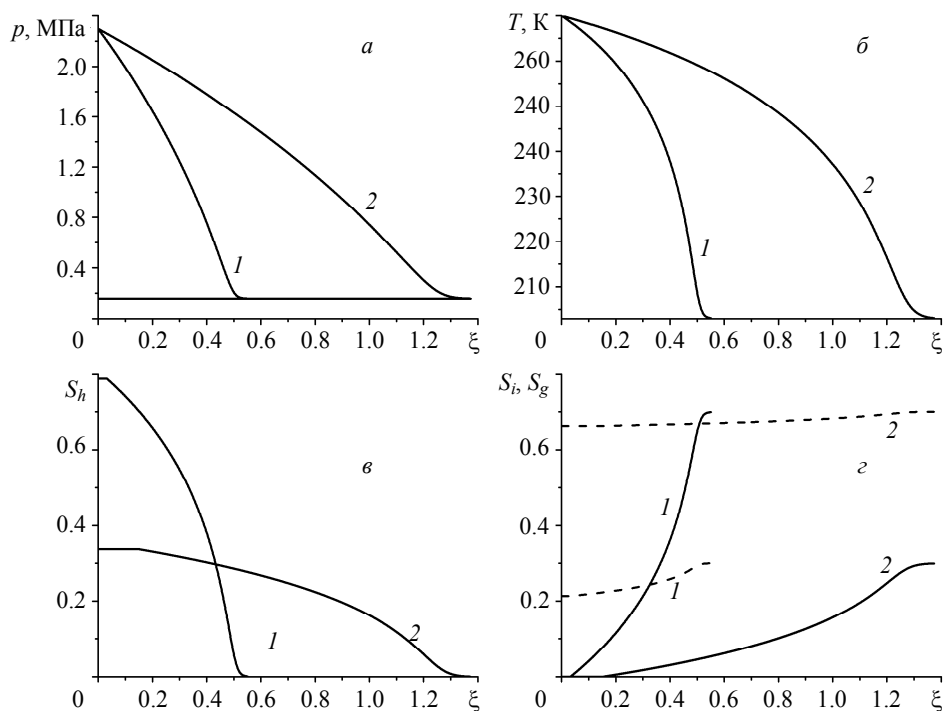


Рис. 3. Распределение давления в пласте (а), температуры пласта (б), гидрато- (в), снего- и газонасыщенности (з) в случае полного образования гидрата в протяженной области

Fig. 3. Pressure distribution in the reservoir (а), temperature of the reservoir (б), hydrate saturation (в), snow and gas saturation in case of full hydrate formation in an extended area (з)

Если величина нагрева ΔT системы «газ+гидрат» оказывается равной минимальному значению ΔT^* , то в этом случае будет происходить полное образование гидрата на фронтальной поверхности.

Установлено, что с ростом начальной снегонасыщенности пласта интенсивность образования гидрата увеличивается, вместе с тем сужается протяженность нагретой области.

Заключение

Построена математическая модель процесса нагнетания газа в пласт в начальном состоянии, насыщенном снегом и газом, сопровождаемого гидратообразованием. Построены автомодельные решения, описывающие распределения основных параметров в пласте. Установлено, что существуют решения, согласно которым обра-

зование газогидрата может происходить в трех различных режимах: полное образование гидрата в объемной области и на фронтальной поверхности, а также частичное образование гидрата.

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*. Netherlands: Springer, 2006. P. 111–126.
2. Нестеров А.Н. Кинетика и механизмы гидратообразования газов в присутствии поверхностно-активных веществ: дис. д-ра хим. наук. Тюмень, 2006.
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. 3rd ed. CRC Press, Taylor & Francis group, 2008. 119 p.
6. Шагапов В.Ш., Тазетдинов Б.И., Нурисламов О.Р. К теории образования и разложения газогидратных частиц в процессе их всплытия в воде // *Вестник Томского государственного университета*. 2013. № 6 (26). С. 106–113.
7. Шагапов В.Ш., Чиглицева А.С., Русинов А.А. О механизмах роста гидратной оболочки на поверхности всплывающих газовых пузырьков // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2015. № 3(35). С. 73–86.
8. Чувилин Е.М., Козлова Е.В. Исследования формирования мерзлых гидратосодержащих пород // *Криосфера Земли*. 2005. № 1. С. 73–80.
9. Chuvin E.M., Kozlova E.V., Makhonina N.A., Yakushev V.S. Experimental investigation of gas hydrate and ice formation in methane saturated sediments / *Permafrost, Phillips, Springman & Arenson (eds.)*. 2003. 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. 13. № 3. С. 70–79.
11. Шагапов В.Ш., Хасанов М.К., Мусакаев Н.Г. Образование газогидрата в пористом резервуаре, частично насыщенном водой, при инжекции холодного газа // *Прикладная механика и техническая физика*. 2008. Т. 49. № 3. С. 462–472.
12. 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 химической технологии*. 2010. Т. 44. № 4. С. 442–449.
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 // *Прикладная механика и техническая физика*. 2011. Т. 52. № 4. С. 116–126.
14. Хасанов М.К. Исследование режимов образования газогидратов в пористой среде, частично насыщенной льдом // *Теплофизика и аэромеханика*. 2015. Т. 22. № 2. С. 255–266.
15. 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.
16. Нигматуллин Р.И. Динамика многофазных сред: в 2 ч. М.: Наука, 1987.
17. Нурисламов О.Р., Шагапов В.Ш. Нагнетание газа во влажную пористую среду с образованием газогидрата // *Прикладная математика и механика*. 2009. № 5. С. 809–823.
18. Шагапов В.Ш., Нурисламов О.Р., Хабибуллина А.Р. Отбор газа из гидратосодержащего пласта депрессионным воздействием // *Вестник Томского государственного университета*. 2012. № 4 (20). С. 119–130.
19. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра, 1982. 212 с.

Статья поступила 26.02.2016 г.

Shagapov V.Sh., Chiglintseva A.S., Rusinov A.A. (2016) THE PROBLEM OF COLD GAS INJECTION INTO THE RESERVOIR SATURATED WITH SNOW AND GAS, ACCOMPANIED BY HYDRATE FORMATION PROCESS. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 3(41). pp. 98–106

DOI 10.17223/19988621/41/10

In this paper, the problem of cold gas injection into the reservoir initially saturated with snow and gas with simultaneous formation of hydrate is considered. The mathematical model assumes gas injection in the equilibrium state. The self-similar solutions describing the distribution of the basic parameters (pressure fields, temperature, hydrate saturation, snow and gas saturation) in the reservoir are constructed. It is found that, depending on the initial state of the system «snow + gas» and the intensity of gas injection, different zones in the filtering area, such as «gas + hydrate», «gas + hydrate + snow», and «gas + snow», can be generated. The existence condition of maximum heating of «gas + snow + hydrate» system which provides a complete transition of snow in the hydration state is obtained. It is shown that initial state of the reservoir and parameters of gas injection define the conditions of full or partial hydrate formation in a volume region and at the front surface. It is revealed that the hydrate formation is more intensive and the length of the heated area decreases with increasing initial snow saturation in the reservoir.

Keywords: gas hydrate, cold gas, injection, snow, equilibrium state, self – similar solution, full and partial hydrate formation, volume region, front surface, heat

SHAGAPOV Vladislav Shaihulagzamovich (Academician of Academy of Sciences of RB, Doctor of Physics and Mathematics, Birskey branch "Bashkir state university", Birskey, Russian Federation; Researcher Institute of Mechanics and Engineering, Kazan, Russian Federation; Researcher Institute of Mechanics, Kazan, Russian Federation)
E-mail: Shagapov@rambler.ru

CHIGLINTSEVA Angelina Sergeevna (Candidate of Physics and Mathematics, Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Science Center, Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia; Bashkir State University, Birskey, Russia)
E-mail: changelina@rambler.ru

RUSINOV Aleksey Aleksandrovich (Candidate of Physics and Mathematics, Bashkir State University, Birskey, Russia)
E-mail: irtysh2009@mail.ru

REFERENCES

1. Jadhawar P., Mohammadi A.H., Yang J., Tohidi B. (2006) Subsurface carbon dioxide storage through clathrate hydrate formation. In: *Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide*. Netherlands: Springer. pp. 111–126. DOI 10.1007/1-4020-4471-2_11.
2. Nesterov A.N. (2006) *Kinetika i mekhanizmy gidratoobrazovaniya gazov v prisutstvii poverkhnostno-aktivnykh veshchestv* [Kinetics and mechanisms of gas hydrate formation in the presence of surface-active substances]. Chem. Doct. Diss. Tyumen'.
3. Makogon Yu.F. (1974) *Gidraty prirodnnykh gazov* [Hydrates of natural gases]. Moscow: Nedra.
4. Istomin V.A., Yakushev V.S. (1992) *Gazovye gidraty v prirodnnykh usloviyakh* [Gas hydrates in the natural environment]. Moscow: Nedra.
5. Sloan E.D., Koh C.A. (2008) *Clathrate hydrates of natural gases*. 3rd ed. CRC Press, Taylor & Francis group.
6. Shagapov V.Sh., Tazetdinov B.I., Nurislamov O.R. (2013) K teorii obrazovaniya i razlozheniya gazogidratnykh chastits v protsesse ikh vsplytiya v vode [A contribution to the theory of gas hydrate particle formation and decomposition in the process of their ascent in water]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 6(26). pp. 106–113.

7. Shagapov V.Sh., Chiglintseva A.S., Rusinov A.A. (2015) O mekhanizmax rosta gidratnoy obolochki na poverkhnosti vsplyvayushchikh gazovykh puzyr'kov [On mechanisms of the hydrate shell growth on the surface of supernatant gas bubbles]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 3(35). pp. 73–86. DOI 10.17223/19988621/35/10.
8. Chuvilin E.M., Kozlova E.V. (2005) Issledovaniya formirovaniya merzlykh gidratosoderzhashchikh porod [Research of formation of frozen gas hydrate-saturated sediment]. *Kriosfera Zemli – Earth Cryosphere*. 1. pp. 73–80.
9. Chuvilin E.M., Kozlova E.V., Makhonina N.A., Yakushev V.S. (2003) Experimental investigation of gas hydrate and ice formation in methane saturated sediments. *Proceedings of 8th International Conference on Permafrost*. pp. 145–150.
10. Chuvilin E.M., Guryeva O.M. (2009) Eksperimental'noe izuchenie obrazovaniya gidratov SO_2 v porovom prostranstve promerzayushchikh i merzlykh porod [Experimental investigation of CO_2 gas hydrate formation in porous media of frozen and freezing sediments]. *Kriosfera Zemli – Earth Cryosphere*. 13(3). pp. 70–79.
11. Shagapov V.Sh., Khasanov M.K., Musakaev N.G. (2008) Formation of a gas hydrate due to injection of a cold gas into a porous reservoir partly saturated by water. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 49(3). pp. 462–472. DOI 10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2015.01.105.
12. Khasanov M.K., Gimaltdinov I.K., Stolpovsky M.V. (2010) 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. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 44(4). pp. 424–431. DOI 10.1134/S004057951004010X.
13. Shagapov V.S., Khasanov M.K., Stolpovskii M.V., Gimaltdinov I.K. (2011) Numerical modeling of formation of a gas hydrate in a finite-length porous bed purged by a gas. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 52(4). pp. 599–607. DOI 10.1134/S0021894411040134.
14. Khasanov M.K. (2015) Investigation of regimes of gas hydrate formation in a porous medium, partially saturated with ice. *Thermophysics and Aeromechanics*. 22(2). pp. 245–255. DOI 10.1134/S0869864315020109.
15. Shagapov V.Sh., Khasanov M.K., Gimaltdinov I.K., Stolpovsky M.V. (2013) The features of gas hydrate dissociation in porous media at warm gas injection. *Thermophysics and Aeromechanics*. 20(3). pp. 339–346. DOI 10.1134/S0869864313030104.
16. Nigmatullin R.I. (1987) *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow: Nauka.
17. Nurislamov O.R., Shagapov V.Sh. (2009) Gas injection into a moist porous medium with the formation of a gas hydrate. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 5. pp. 581–591. DOI 10.1016/j.jappmathmech.2009.11.011.
18. Shagapov V.Sh., Nurislamov O.R., Khabibullina A.R. (2012) Otbor gaza iz gidratosoderzhashchego plasta depressionnym vozdeystviem [Gas extraction from a bed containing hydrates by means of depression influence]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 4(20). pp. 119–130.
19. Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M. (1982) *Dvizhenie zhidkostey i gazov v prirodnykh plastakh* [Motion of liquids and gases in natural beds]. Moscow: Nedra.