

УДК 532.546:536.421

Г.Р. Рафикова, В.Ш. Шагапов<sup>1</sup>

## НАГНЕТАНИЕ ГАЗА В ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ ПОРИСТЫЙ ПЛАСТ С ОБРАЗОВАНИЕМ ГИДРАТА В ДИФФУЗИОННОМ РЕЖИМЕ<sup>2</sup>

В работе рассмотрена задача о нагнетании газа в пористый пласт, изначально насыщенный газом и водой, сопровождающемся образованием гидрата. Рассмотрен случай, когда интенсивность гидратообразования лимитируется диффузией воды через гидратный слой, образовавшийся между водой и газом в ядре порового канала. В рамках такой схемы кинетика гидратообразования определяется одним эмпирическим параметром  $D$ , имеющим размерность коэффициента диффузии ( $\text{м}^2/\text{с}$ ). Изучено влияние величины этого параметра на особенности процесса гидратообразования в зависимости от параметров, определяющих исходное состояние пористого резервуара и его коллекторских характеристик.

**Ключевые слова:** пористая среда, фильтрация, газовый гидрат, диффузия, образование гидрата.

## Введение

Гидратное состояние является выгодным для консервации и хранения углеводородных газов. В  $1 \text{ м}^3$  газогидрата метана при  $T=0^\circ\text{C}$  и  $p=3 \text{ МПа}$  содержится около  $160 \text{ м}^3$  метана. Для того чтобы такую массу газа хранить в свободном состоянии в одном кубическом метре, давление необходимо повышать более чем до  $16 \text{ МПа}$ . Поэтому представляется привлекательным создавать такие условия хранения газов в подземных резервуарах, чтобы значительная его часть находилась в составе газогидрата.

Исследования процессов образования и разложения газовых гидратов в пористых средах проводились такими авторами, как Г.Г. Цыпкин, Э.А. Бондарев, И.К. Гималтдинов, М.К. Хасанов, О.Р. Нурисламов и др. [1–5]. В работах получены автомоделные и численные решения, позволяющие изучать процессы образования и разложения газогидратов в пористых пластах с движущейся фрон-

<sup>1</sup>© Рафикова Г.Р., Шагапов В.Ш., 2016

Рафикова Гузаль Ринатовна (rafikova\_guzal@mail.ru), кафедра высшей и прикладной математики, Бирский филиал Башкирского государственного университета, 452453, г. Бирск, Интернациональная, 10.

Шагапов Владислав Шайхулагзамович (shagapov@rambler.ru), лаборатория «Механика сплошной среды», Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН, 420111, г. Казань, Лобачевского, 2/31.

<sup>2</sup>Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-11-20022).

тальной границей фазовых переходов при равновесных условиях. Однако остается открытым вопрос об основных механизмах, лимитирующих процессы образования газогидратов. В данной работе представлена математическая модель процесса образования гидрата в пористой среде, насыщенной жидкостью, вследствие диффузионного переноса воды через гидратную корку.

## 1. Основные уравнения

Рассмотрим процесс фильтрации метана в пористой среде, частично насыщенной водой при термобарических условиях стабильности газогидрата (давление и температура удовлетворяют условию  $p > p_s(T)$ , где  $p_s(T)$  – равновесное давление фазовых переходов при температуре  $T$ ). Скелет пористой среды, воду и газогидрат будем полагать несжимаемыми, а также неподвижными. Следовательно, для истинных плотностей и скоростей этих фаз имеет место:

$$\rho_{sk}^0 = \rho_w^0 = \rho_h^0 = const, \quad v_{sk} = v_w = v_h = 0. \quad (1)$$

Здесь и в дальнейшем нижние индексы  $sk$ ,  $wh$ ,  $h$  и  $g$  соответствуют параметрам, относящимся к скелету, воде, газогидрату и газу.

Пусть  $m$  и  $S_i$  – пористость скелета и относительная объемная насыщенность пор водой, гидратом и газом ( $i = w, h, g$ ). В рамках вышеперечисленных допущений уравнения сохранения масс для плоскоодномерного течения запишем в виде:

$$\frac{\partial (mS_w\rho_w^0)}{\partial t} = -J_w, \quad \frac{\partial (mS_h\rho_h^0)}{\partial t} = J_h, \quad \frac{\partial (mS_g\rho_g^0)}{\partial t} + \frac{\partial (mS_g v_g \rho_g^0)}{\partial x} = -J_g. \quad (2)$$

Здесь  $v_g$  – скорость газа,  $J_w$  и  $J_g$  – интенсивности потребления воды и газа на образование гидрата с интенсивностью  $J_h$  в единице объема пористой среды. Газогидрат является клатратным соединением [6], для которого на одну молекулу метана приходится шесть молекул воды. Поэтому массовое содержание метана  $G$  в составе гидрата постоянное число ( $G \approx 0.12$ ). В этой связи для  $J_w$ ,  $J_g$  и  $J_h$  должны выполняться следующие кинематические соотношения:

$$J_w = (1 - G) J_h, \quad J_g = G J_h. \quad (3)$$

С учетом этих соотношений из первого и второго уравнений (2) получим

$$mS_w\rho_w^0 + (1 - G) mS_h\rho_h^0 = const. \quad (4)$$

Полагая, что для исходного состояния ( $t=0$ )  $S_h=0$  и  $S_w=S_{w0}$ , то из (4) следует

$$\rho_w^0 (S_w - S_{w0}) + (1 - G) \rho_h^0 S_h = 0. \quad (5)$$

На основе кинематического условия

$$S_w + S_h + S_g = 1 \quad (6)$$

с учетом (5) можем получить

$$S_h = \frac{(1 - S_{w0} - S_g)}{(1 - \rho_h(1 - G)/\rho_w)}, \quad S_w = S_{w0} - \frac{\rho_h}{\rho_w} (1 - G) S_h. \quad (7)$$

Следовательно, текущие величины гидратонасыщенности  $S_h$  и водонасыщенности  $S_w$  однозначно определяются значением газонасыщенности  $S_g$ .

Полагая, что температура для скелета пористой среды и всех ее составляющих совпадает ( $T_{sk}=T_w=T_h=T_g=T$ ), и пренебрегая баротермическим эффектом по

сравнению с тепловыми эффектами за счет гидратообразования, запишем уравнение притока тепла:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_g^0 c_g m S_g v_g \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + J_h l, \quad (8)$$

$$\rho c = (1 - m) \rho_{sk}^0 c_{sk} + m \sum_{j=w,g,h} \rho_j^0 S_j c_j, \quad \lambda = (1 - m) \lambda_{sk} + m \sum_{j=w,g,h} S_j \lambda_j.$$

Здесь  $c_j$ ,  $\lambda_j$  – удельная теплоемкость и теплопроводность фаз ( $j = w, g, h$ ) и  $\rho c$  и  $\lambda$  – удельная объемная теплоемкость и теплопроводность системы. Второе слагаемое в правой части (8) выражает тепловой эффект гидратообразования, где  $l$  – удельная теплота, отнесенная на единицу массы гидрата, которая выделяется при его образовании.

Для газовой фазы примем уравнение Клайперона – Менделеева

$$p = \rho_g^0 R_g T. \quad (9)$$

Для процесса фильтрации примем обобщенный закон Дарси

$$m S_g v_g = - \frac{k_g}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (10)$$

где  $\mu_g$  – динамическая вязкость газа,  $m$  – ”живая” проницаемость, зависящая от ”живой” пористости  $m S_g$  и характерных ”живых” радиусов пор.

Пусть пласт протяженностью  $x_0$  ( $0 \leq x \leq x_0$ ) в исходном состоянии насыщен водой и газом (метаном), начальное давление  $p_0$  и  $T_0$  температура удовлетворяют условиям фазового равновесия

$$T = T_0, \quad p = p_s(T), \quad S_w = S_{w0}, \quad S_g = 1 - S_{w0} \quad (0 < x < x_0, \quad t = 0). \quad (11)$$

При  $t \geq 0$  через левую границу пласта ( $x=0$ ) происходит нагнетание газа при давлении  $p_e$  с температурой газа  $T_e$ , соответствующим термобарическим условиям образования гидрата.

$$T = T_e, \quad p = p_e, \quad (x = 0, \quad t > 0). \quad (12)$$

Будем полагать, что потоки массы и тепла через правую границу ( $x = x_0$ ) отсутствуют

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (x = x_0, \quad t > 0). \quad (13)$$

## 2. Кинетика образования гидрата

Будем полагать, что интенсивность гидратообразования лимитируется диффузией воды через твердую гидратную корку, образующуюся между газом и жидкостью при их контакте. Для построения аналитических выражений для кинетики гидратообразования в рамках вышеотмеченной гипотезы рассмотрим следующую предельную схему. Примем, что вода полностью покрывает стенки пористых каналов.

Пористую среду (скелет) схематично представим как систему осесимметричных каналов средним радиусом  $r = a$ . Тогда, согласно рассматриваемой схеме, вода будет находиться в кольцевом слое между  $r = a$  и  $r = a_{wh}$ , гидрат в слое между  $r = a_{wh}$  и  $r = a_g$ , а газ будет течь в канале радиуса  $r = a_g$ . В рамках такой схемы введенные линейные размеры и относительные фазовые насыщенности будут связаны следующими соотношениями:

$$S_w = 1 - \left( \frac{a_{wh}}{a} \right)^2, \quad S_h = \left( \frac{a_{wh}}{a} \right)^2 - \left( \frac{a_g}{a} \right)^2, \quad S_g = \left( \frac{a_g}{a} \right)^2. \quad (14)$$

Таким образом, в соответствии с вышепринятым допущением, скорость образования гидрата лимитируется диффузией воды через образовавшийся гидратный слой между газом и водой. Такую воду со средней плотностью  $\rho_w^0$ , в гидрате будем называть диффундирующей (или подвижной). Воду, находящуюся в составе гидрата с массовой концентрацией  $(1 - G)$ , будем называть неподвижной. Для процесса переноса подвижной воды через гидратный слой в масштабе поровых микроканалов запишем уравнение диффузии

$$\frac{\partial \rho_w^0}{\partial t} = \frac{D_w}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \rho_w^0}{\partial r} \right), \quad a_{(wh)} < r < a_g. \quad (15)$$

Далее будем использовать квазистационарное решение, полагая  $\partial \rho_w^0 / \partial t = 0$  и применяя следующие граничные условия:

$$\rho_w^0 = \rho_{w(s)}^0, \quad r = a_{(wh)}, \quad \rho_w^0 = 0, \quad r = a_g, \quad (16)$$

получаем решение уравнения (15) в виде:

$$\rho_w^0 = \rho_{w(s)}^0 \frac{\ln(r/a_g)}{\ln(a_{(wh)}/a_g)}, \quad (a_{(wh)} < r < a_g), \quad (17)$$

здесь  $\rho_{w(s)}^0$  – средняя плотность подвижной жидкости в составе гидрата.

Отметим, что второе условие из (16) означает мгновенный переход подвижной воды в состав гидрата при достижении границы контакта с газом.

Выражение для потока массы подвижной воды к поверхности контакта между газом и гидратом, отнесенного к единице ее площади, запишем в виде:

$$j_w = D_w \left( \frac{\partial \rho_w^0}{\partial r} \right)_{a_g}. \quad (18)$$

Подставляя сюда решение (17), получим

$$j_w = \frac{\rho_{w(s)}^0 D_w}{a_g \ln(a_{(wh)}/a_g)} \quad (19)$$

Чтобы связать поток массы подвижной жидкости  $j_w$  с интенсивностью потребления воды на гидратообразование в единице объема пористой среды  $J_w$ , необходимо определить полную площадь поверхности контакта (удельная поверхность контакта) между гидратом и газом. В рамках принятой схемы для этой площади можем записать:

$$s_g = 2\pi a_g n_g, \quad n_g = \frac{m S_g}{\pi a_g^2}, \quad (20)$$

где  $n_g$  – число каналов радиусом  $a_g$  в единице объема пористой среды. Тогда из выражений (20) для величины удельной поверхности контакта имеем

$$s_g = \frac{2m S_g}{a_g}. \quad (21)$$

Для интенсивности  $J_w$  потребления воды на образование гидрата в единице объема газа, связанной с  $j_w$  как  $J_w = s_g j_w$ , с учетом (19) и (21) получим:

$$J_w = 2m S_g \frac{\rho_{w(s)}^0 D_w}{a_{(wh)}^2 \ln(a_{(wh)}/a_g)}. \quad (22)$$

Здесь отметим, что  $\rho_{w(s)}^0$  и  $D_w$  являются неизвестными эмпирическими параметрами, которые в полученные решения для интенсивности потребления воды входят в виде произведения.

Поэтому для дальнейших вычислений введем один эмпирический параметр — приведенный коэффициент диффузии, отвечающий за кинетику образования газогидрата

$$D = \frac{D_w \rho_{w(s)}^0}{\rho_w^0}. \quad (23)$$

Выражение (22) с учетом (23) примет вид:

$$J_w = 2mS_g \frac{\rho_w^0 D}{a_g^2 \ln(a_{(wh)}/a_g)}. \quad (24)$$

Как показывают многочисленные опытные данные [7–9], интенсивность гидратообразования при контакте воды и метана сильно зависит от состояния воды и газа, в частности, от их чистоты. Например, для талой воды, водопроводной воды и воды, полученной при разложении гидрата, темпы гидратообразования будут совершенно разные [10]. Кроме того, содержание небольшой доли примесей других газов в составе метана также влияет на процесс гидратообразования при контакте метана и воды [8; 9]. На интенсивность гидратообразования можно также повлиять с помощью внедрения в состав воды различных полимерных добавок [11]. Очевидно, что для рассматриваемых в работе процессов эмпирический параметр  $D$  будет зависеть также от особенностей скелета пористой среды.

Таким образом, принятая схема фазовых переходов (гидратообразования) обуславливается еще одним модельным эмпирическим параметром  $D$ , имеющим размерность коэффициента диффузии.

В соответствии с вышепринятыми допущениями ”живая” проницаемость для газа будет задаваться как

$$k_g = k(a_g/a)^2, \quad (25)$$

где  $k$  – коэффициент абсолютной проницаемости скелета.

### 3. Результаты исследования

Для параметров, характеризующих систему ”пористая среда – газогидрат – газ – вода” здесь и в дальнейшем приняты следующие значения  $m = 0.1$ ,  $k = 10^{-9} \text{ м}^2$ ,  $\mu_g = 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $\rho_c = 2.5 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ,  $\lambda = 2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ,  $l = 5 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}$ ,  $\rho_h^0 = 900 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $G = 0.12$ ,  $\rho_w^0 = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $R_g = 520 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ,  $c_g = 1560 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ,  $D = 5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ . Протяженность пористого пласта берем равной  $x_0 = 100 \text{ м}$ . Отметим, что принятые значения для приведенного коэффициента  $D$  по порядку величин близки к опытным данным [8, 12] по интенсивности роста гидратной корки при миграции метанового пузырька в морской воде, в термобарических условиях образования гидрата.

Для исходных и граничных температур и давлений принято  $T_0 = 273 \text{ К}$ ,  $T_e = 273 \text{ К}$  и  $p_0 = p_s(T_0)$ ,  $p_e = 10 \text{ МПа}$ , начальная водонасыщенность полагалась равной  $S_{w0} = 0.3$ .

На рис. 1 линиями 1, 2 и 3 представлены распределения давления ( $a$ ), температуры ( $b$ ) и гидратонасыщенности ( $\epsilon$ ) в моменты времени  $t = 0.5, 1$  и 3 с соответственно. Здесь и в дальнейшем штриховая линия соответствует равновесной температуре для текущих значений давлений пласта.

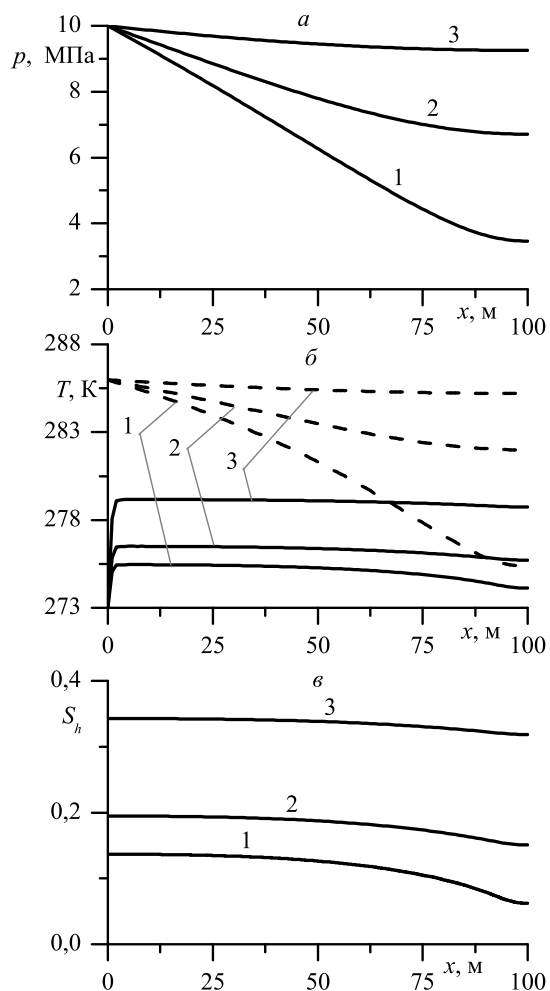


Рис. 1. Распределения давления  $p$  (а), температуры  $T$  (б) и гидратонасыщенности  $S_h$  (в) (1 –  $t=0.5$  с, 2 –  $t=1$  с, 3 –  $t=3$  с)

Видно, что при данном режиме в пористой среде наблюдается достижение однородного давления  $p = p_e$  (за секунды), то есть за достаточно короткий период устанавливается гомобарический режим [13]. Текущая температура при этом не успевает проследить за равновесным значением температуры для текущего давления. Затем в остальное время после достижения давления в пористом пласте граничного значения  $p = p_e$  накопление гидратной массы происходит в гомобарическом режиме.

На рис. 2 представлены осциллограммы давления (а), температуры (б) и гидрато- и водонасыщенности (в) в точке с координатой  $x=50$  м при различных значениях водонасыщенности  $S_{w0}=0.3$  и  $0.5$  (линия 1 и 2 соответственно). Точечные линии иллюстрируют эволюцию водонасыщенности.

При начальной водонасыщенности  $S_{w0}=0.3$  гидратообразование проходит интенсивнее (примерно в полтора раза) по сравнению со значением большей водо-

насыщенности  $S_{w0} = 0.5$ , что объясняется более высокой удельной площадью контакта между гидратом и газом.

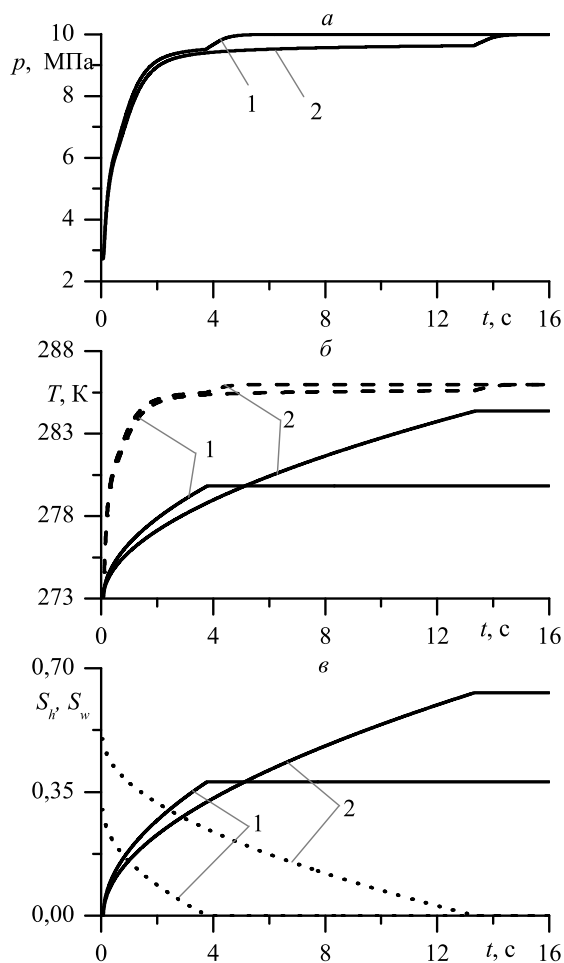


Рис. 2. Динамика давления  $p$  (а), температуры  $T$  (б) и гидратонасыщенности  $S_h$  (в) в точке  $x = 50$  м для различных значений начальной водонасыщенности  $S_{w0}$  (1 –  $S_{w0} = 0.3$ , 2 –  $S_{w0} = 0.5$ )

На рис. 3 линиями 1, 2, 3 представлена динамика давления, температуры, гидратонасыщенности в точке с координатой  $x = 50$  м при начальном значении водонасыщенности  $S_{w0} = 0.3$  при следующих значениях приведенного коэффициента диффузии  $D = 5 \cdot 10^{-10}$ ,  $5 \cdot 10^{-11}$  и  $5 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>/с соответственно. Правая часть рис. 3 представляет собой увеличенные фрагменты для начального этапа.

Определяющими параметрами характерных времен фильтрации  $t^{(p)}$  (время выравнивания давления в пласте до граничного значения) и диффузии воды  $t^{(D)}$  (накопление гидрата) являются коэффициент пьезопроводности  $\chi^{(p)}$  ( $t^{(p)} \approx x_0^2 / \chi^{(p)}$ ) и диффузии  $D$  ( $t^{(D)} \approx a^2 / D$ ). Из рис. 3 следует, что если для коэффициента диффузии принять  $D = 5 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с за время полного перехода воды в состав гидрата, давление в резервуаре не успевает достичь значения  $p = p_e$ . При дальнейшем

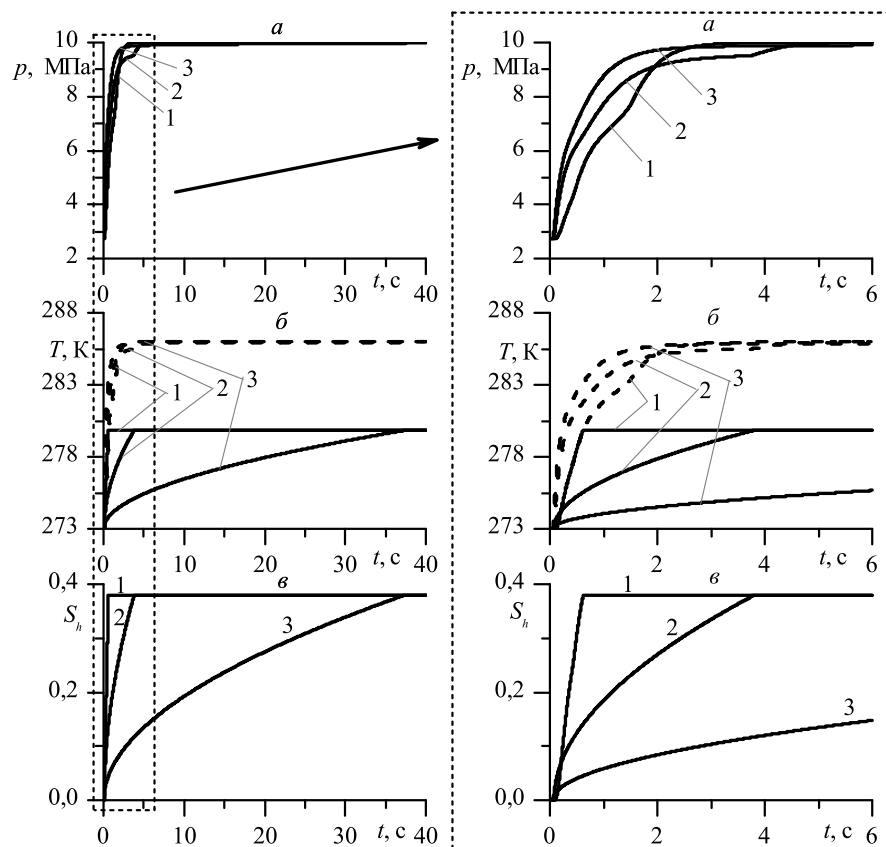


Рис. 3. Осциллограммы давления  $p$  (а), температуры  $T$  (б) и гидратонасыщенности  $S_h$  (в) в точке  $x = 50$  м для различных приведенных коэффициентов диффузии (1 –  $D = 5 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с, 2 –  $D = 5 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с, 3 –  $D = 5 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>/с)

уменьшении коэффициента диффузии ( $D \sim 5 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с) наблюдается примерно одинаковое значение характерных времен  $t^{(D)} \approx t^{(p)}$ . При малых значениях коэффициента диффузии процесс установления однородного давления ( $p \approx p_e$ ) будет происходить гораздо быстрее процесса полного перехода воды в пористой среде в состав гидрата  $t^{(D)} < t^{(p)}$ .

## Заключение

В работе численно исследован процесс образования газогидрата метана в частично водонасыщенном пористом пласте при нагнетании газа. Выявлено, что основной период гидратообразования в рассмотренном случае происходит в гомобарическом режиме. Установлено, что при снижении начальной водонасыщенности растет интенсивность накопления гидрата. При больших значениях коэффициента диффузии процесс гидратообразования происходит быстрее, чем процесс установления однородного давления ( $p \approx p_e$ ). Интенсивность гидратообразования в пори-



стом резервуаре, частично насыщенном водой, характеризуемая величиной эмпирического параметра  $D$ , имеющего размерность коэффициента диффузии, можно усилить за счет изменения качества воды. В частности, повышение эмпирического коэффициента диффузии  $D$ , в свою очередь, можно произвести соответствующей обработкой воды, добавкой полимерных примесей, поверхностно-активных веществ.

## Литература

- [1] Нурисламов О.Р., Шагапов В.Ш. Нагнетание газа во влажную пористую среду с образованием газогидрата // Прикладная математика и механика. 2009. Т. 73. № 5. С. 809–823.
- [2] Особенности разложения газовых гидратов в пористых средах при нагнетании теплого газа / В.Ш. Шагапов [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20. № 3. С. 347–354.
- [3] Численное моделирование образования газогидрата в пористом пласте конечной протяженности при продувке его газом / В.Ш. Шагапов [и др.] // Прикладная математика и техническая физика. 2011. Т. 52. № 4. С. 116–126.
- [4] Цыпкин Г.Г. Течения с фазовыми переходами в пористых средах. М.: Физматлит, 2009. 232 с.
- [5] Бондарев Э.А., Максимов А.М., Цыпкин Г.Г. К математическому моделированию диссоциации газовых гидратов // Докл. АН СССР. 1989. Т. 308. № 3. С. 575–578.
- [6] Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992. 236 с.
- [7] Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. М.: Недра, 1974. 208 с.
- [8] Ehnaced lifetime of methane bubble streams within the deep ocean / G. Rehder [et al.] // Geophysical research letters. 2002. № 29. P. 21.
- [9] Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? / D.F. McGinnis [et al.] // Journal of geophysical research. 2006. V. 111. P. 382.
- [10] Булейко В.М., Вовчук Г.А., Григорьев Б.А. Экспериментальное исследование термодинамических свойств гидратов углеводородов алканового ряда // Вести газовой науки. 2012. № 3(11). С. 282.
- [11] Нестеров А.Н. Применение поверхностно-активных веществ для интенсификации процессов образования гидратов в технологиях транспорта и хранения газа // Современное состояние газогидратных исследований в мире и практические результаты для газовой промышленности. М: ООО ИРЦ Газпром, 2004. С. 66.
- [12] Тазетдинов Б.И. Особенности образования и разложения газогидратов в водных и газовых средах: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Уфа: БашГУ, 2014. 113 с.
- [13] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред: в 2 ч. М: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с. Ч. 2. 359 с.;

## References

- [1] Nurislamov O.R., Shagapov V.Sh. Nagnetanie gaza vo vlazhnuiu poristuiu sredu s obrazovaniem gazogidrata [Gas injection into a moist porous medium with the formation of a gas hydrate]. *Prikladnaya matematika i mekhanika* [Applied Mathematics and Mechanics], 2009, V. 73, no. 5, pp. 809–823 [in Russian].

- [2] Shagapov V.Sh., Hasanov M.K., Gimaltdinov I.K., Stolpovskii M.V. Osobennosti razlozheniia gazovykh gidratov v poristyx sredakh pri nagnetanii teplogo gaza [The features of gas hydrate dissociation in porous media at warm gas injection]. *Teplofizika i aeromekhanika* [Thermophysics and Aeromechanics], 2013, V. 20, no. 3, pp. 347–354 [in Russian].
- [3] Shagapov V.Sh., Hasanov M.K., Gimaltdinov I.K., Stolpovskii M.V. Chislennoe modelirovanie obrazovaniia gazogidrata v poristom plaste konechnoi protiazhenosti pri produvke ego gazom [Numerical modeling of formation of a gas hydrate in a finite-length porous bed purged by a gas]. *Prikladnaia matematika i tekhnicheskaiia fizika* [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics], 2011, V. 52, no. 4, pp. 116–126 [in Russian].
- [4] Chypkin G.G. Teheniiia s fazovymi perekhodami v poristyx sredakh [Flows with phase transitions in porous media]. M.: Fizmatlit, 2009, 232 p. [in Russian].
- [5] Bondarev E.A., Maksimov A.M., Tsyppkin G.G. K matematicheskomu modelirovaniuu dissotsiatsii gazovykh gidratov [On the mathematical modeling of dissociation of gas hydrates]. *Dokl. AN SSSR* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], 1989, V. 308, no. 3, pp. 575–578 [in Russian].
- [6] Istomin V.A., Yakushev V.S. Gazovye gidraty v prirodnykh usloviakh [Gas hydrates in nature]. M.: Nedra, 1992, 236 p. [in Russian].
- [7] Makogon Yu.F. Gidraty prirodnykh gazov [Hydrates of natural gases]. M.: Nedra, 1974, 208 p. [in Russian].
- [8] Rehder G, Brewer P.W., Peltzer E.T., Friederich G. Ehnaced lifetime of methane bubble streams within the deep ocean. *Geophysical research letters*, 2002, no. 29, pp. 21 [in English].
- [9] MgGinnis D.F., Greinert J., Artemov Y., Beaubien S.E., Wuest A. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? *Journal of geophysical research*, 2006, V. 111, pp. 382 [in English].
- [10] Buleiko V.M., Vovchuk G.A., Grigoriev B.A. Eksperimental'noe issledovanie termodinamicheskikh svoistv gidratov uglevodorodov alkanovogo riada [Experimental study of thermodynamic properties of hydrocarbons alkane series]. *Vesti gazovoi nauki* [Gas Science News], 2012, no. 3(11), pp. 282 [in Russian].
- [11] Nesterov A.N. Primenenie poverkhnostno-aktivnykh veshchestv dlia intensivatsii protsessov obrazovaniia gidratov v tekhnologiiakh transporta i khraneniia gaza [Use of surfactants for the intensification of the processes of formation of hydrates in the technologies of transportation and storage of gas] in *Sovremennoe sostoianie gazogidratnykh issledovaniy v mire i prakticheskie rezul'taty dlia gazovoi promyshlennosti* [Modern state of gas hydrates researches in the world and practical results for gas industry]. M.: OOO IRTs Gazprom, 2004, pp. 66 [in Russian].
- [12] Tazetdinov B.I. *Osobennosti obrazovaniia i razlozheniia gazogidratov v vodnykh i gazovykh sredakh: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk* [Features of formation and decomposition of gas hydrates in aqueous and gaseous environments: Candidate's of Physical and Mathematical Sciences thesis]. U.: BashGU, 2014, 113 p. [in Russian].
- [13] Nigmatulin R.I. Dinamika mnogofaznykh sred. V 2 ch. [Dynamics of multiphase medium. In 2 parts]. M.: Nauka, 1987. Part 1, 464 p. Part 2, 359 p. [in Russian].

*G.R. Rafikova, V.Sh. Shagapov*<sup>3</sup>

## INJECTING GAS INTO THE WATER-FILLED POROSITY RESERVOIRS WITH THE FORMATION OF HYDRATES IN THE DIFFUSION MODE<sup>4</sup>

The paper considers the problem of injecting gas into the porous layer initially saturated with gas and water, accompanied by formation of hydrate. We have investigated case where the intensity of hydrate is limited by diffusion of water through the hydrate layer formed between water and gas in the core of the pore of the channel. As part of this scheme kinetics of hydrate is determined one empirical parameter  $D$  having the dimension of the diffusion coefficient ( $\text{m}^2/\text{s}$ ). We have analyzed effect of the value of this parameter on the features of the process of hydrate formation, depending on the parameters that define the initial state of porous reservoir and reservoir characteristics.

**Key words:** porous media, filtration, gas hydrate, diffusion, formation of hydrate.

Статья поступила в редакцию 3/II/2016.  
The article received 3/II/2016.

---

<sup>3</sup>*Rafikova Guzal Rinatovna* ([rafikova\\_guzal@mail.ru](mailto:rafikova_guzal@mail.ru)), Department of Higher and Applied Mathematics, Birk branch of the Bashkir State University, 10, Internatsionalnaia Street, Birk, 452453, Russian Federation.

*Shagapov Vladislav Shayhulagzamovich* ([shagapov@rambler.ru](mailto:shagapov@rambler.ru)), laboratory "Continuum mechanics", Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 2/31, Lobachevskiy Street, Kazan, Russian Federation.

<sup>4</sup>The study was performed by a grant from the Russian Science Foundation (project No.15-11-20022).