

Максим Владимирович СТОЛПОВСКИЙ<sup>1</sup>  
Екатерина Павловна ЩЕГЛОВА<sup>2</sup>

УДК 532.546:536.421

## О НАГРЕВЕ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ

<sup>1</sup> кандидат физико-математических наук,  
старший преподаватель кафедры физики,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет  
s\_maxim.pmm@mail.ru

<sup>2</sup> преподаватель кафедры физики,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет  
ekaterina-scheglova@rambler.ru

### Аннотация

Проведено численное моделирование процесса образования газогидрата в результате нагнетания холодного газа в пористую среду, изначально насыщенную газом и водой. Особенностью математической модели этой задачи является не только учет фазовых переходов, но и учет массопереноса в пористой среде. Необходимость учитывать движение газа в пористой среде усложняет задачу, т. к., хотя она и сводится к задаче Стефана, здесь температура фазового перехода зависит от давления. Эта особенность является существенной, поскольку, как показано в работах, это приводит к возникновению ситуации, когда фазовые переходы реализуются в протяженной области.

Для получения решений, адекватно описывающих рассматриваемый процесс для последующих этапов времени, возникает необходимость в построении численных схем, пригодных для пластов конечной протяженности. Алгоритмы сквозного счета особенно широко применяются для многомерных задач, однако точность расчета значения температуры и положения границы раздела фаз сильно зависит от параметра сглаживания, определение которых часто затруднительно. В данной работе для решения задачи

---

**Цитирование:** Столповский М. В. О нагреве пористой среды при образовании газовых гидратов / М. В. Столповский, Е. П. Щеглова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Т. 2. № 2. С. 23–35.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-23-35

используется метод ловли фронта в узел пространственной сетки. При этом аналитические решения задач в автоматическом приближении используются для тестирования численных алгоритмов, основанных на данном методе.

В статье показано, что в зависимости от параметров нагнетаемого газа образование гидрата может происходить как на фронтальной поверхности, так и в протяженной области. В первом случае образование гидрата происходит без нагрева среды, а во втором сопровождается ее нагревом, причем его величина увеличивается с ростом давления нагнетаемого газа. Численными расчетами установлено, что режим с нагревом пористой среды реализуется в высокопроницаемых пластах в тех случаях, когда величина давления нагнетаемого газа превышает величину равновесного давления, соответствующего исходной температуре пласта.

#### **Ключевые слова**

Газовые гидраты, подвижные границы фазовых переходов, метод ловли фронтов в узлы пространственной сетки.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-23-35**

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, их можно использовать 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 тех же температуре и давлении [1].

При этом процессы гидратообразования сопровождаются выделением скрытой теплоты гидратообразования, что может приводить к значительным повышениям температуры в пористой среде [3]. 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.

В работах [1–3] было получено аналитическое решение рассматриваемой задачи в автоматическом приближении для пласта бесконечной протяженности. Такая постановка применительно к задаче об образовании газовых гидратов в пористых пластах конечной протяженности соответствует начальному этапу процесса, когда влияние границ не существенно.

Математическая модель образования и разложения газогидратов в пористой среде бесконечной протяженности рассмотрена в работах [4–14]. В этих работах получены автоматические 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).

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 теплопереноса 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 [12] 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;  $\rho_j$  и  $S_j$  ( $j = g, h, l$ ) — истинные плотности и насыщенности пор  $j$ -й фазой;  $v_g, k_g, c_g$  и  $\mu_g$  — соответственно скорость, проницаемость, удельная теплоемкость и динамическая вязкость газовой фазы;  $p$  — давление;  $T$  — температура;  $L_h$  — удельная теплота гидратообразования;  $\rho c$  и  $\lambda$  представляют собой удельную объемную теплоемкость и коэффициент теплопроводности системы «пористая среда — газогидрат», которые при отмеченных допущениях можно считать постоянными величинами; индексы  $h, l$  и  $g$  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  $\psi$  на границе  $x = x_{(i)}$ ,  $\dot{x}_{(i)}$  — скорость движения данной границы. Температуру и давление на границе будем считать непрерывными величинами.

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

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

где  $T_0$  — 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

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

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

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

Будем полагать, что при инъекции холодного газа в пласте в общем случае образуются три характерные области, в которых газ, гидрат и вода находятся в различных состояниях. В первой (ближней) области, примыкающей к левой границе пласта, вода полностью перешла в гидратное состояние, поэтому в порах присутствуют только газ и гидрат. Примыкающая к правой границе пласта третья (дальняя) область насыщена газом и водой, а промежуточная область, разделяющая между собой вышеуказанные области, содержит газ, гидрат и воду в состоянии термодинамического равновесия. 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 следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{p}{T} \right) &= \frac{k_g}{m\mu_g S_g} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p}{T} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right), \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa^{(T)} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{c_g k_g}{\mu_g \rho c} \frac{p}{R_g T} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для промежуточной области аналогичные уравнения примут вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{p}{T} \right) &= \frac{k_g}{m\mu_g S_g} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p}{T} \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \mathfrak{R} \frac{\partial S_h}{\partial t}, \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa^{(T)} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{c_g k_g}{\mu_g \rho c} \frac{p}{R_g T} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \Delta T \frac{\partial S_h}{\partial t}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\mathfrak{R} = \frac{G\rho_h R_g}{1 - S_{l0}}$ ,  $\Delta T = \frac{m\rho_h L_h}{\rho c}$ ,  $\kappa^{(T)} = \frac{\lambda}{\rho c}$  — коэффициент температуропро-

водности пласта. Исключив из системы (9) производную гидратонасыщенности по времени с учетом соотношений (5), мы получим систему для нахождения распределений давления (и соответственно температуры) и гидратонасыщенности в протяженной области:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{p}{T} \right) &= \frac{k_g}{m\mu_g S_g} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p}{T} \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \frac{\Re}{\Delta T} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\kappa^{(T)} \Re}{\Delta T} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{c_g k_g \Re}{\mu_g \rho c \Delta T R_g} \frac{p}{T} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x}, \\ \frac{\partial S_h}{\partial t} &= \frac{1}{\Delta T} \left[ \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa^{(T)} \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{c_g k_g}{\mu_g \rho c} \frac{p}{R_g T} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

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

$$\begin{aligned} mS_{g(n)}^- \rho_{g(n)}^- (v_{g(n)}^- - \dot{x}_{(n)}) &= mS_{g(n)}^+ \rho_{g(n)}^+ (v_{g(n)}^+ - \dot{x}_{(n)}) + m(S_{h(n)}^- - S_{h(n)}^+) \rho_h G \dot{x}_{(n)}, \\ mS_{l(n)}^+ \rho_l \dot{x}_{(n)} &= m(S_{h(n)}^- - S_{h(n)}^+) \rho_h (1 - G) \dot{x}_{(n)}, \\ \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{(n)}^- - \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{(n)}^+ &= m \rho_h L_h (S_{h(n)}^- - S_{h(n)}^+) \dot{x}_{(n)}. \end{aligned} \quad (11)$$

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 следующий вид:

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

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 [2].

На Рис. 1 а) представлены распределения температуры и гидратонасыщенности пласта при нагнетании газа (метана) под давлением  $p_e = 5$  МПа и температурой  $T_e = 276$  К в модельный пористый пласт длины  $L = 1$  м и начальными давлением  $p_0 = 3$  МПа, температурой  $T_0 = 280$  К и водонасыщенностью  $S_0 = 0,2$ . Для остальных параметров, характеризующих систему, приняты следующие значения: пористость  $m = 0,1$ ,  $G = 0,12$ ,  $T_* = 10$  К,  $p_{s0} = 5,5$  МПа, абсолютная проницаемость пласта  $k_0 = 10^{-13}$  м<sup>2</sup>, приведенная газовая постоянная  $R_g = 520$  Дж/(К·кг), плотности  $\rho_{sk} = 2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_h = 900$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_l = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, удельные теплоемкости  $c_{sk} = 1000$  Дж/(К·кг),  $c_h = 2500$  Дж/(К·кг),  $c_l = 4200$  Дж/(К·кг),  $c_g = 1560$  Дж/(К·кг),  $\rho c = 2,5 \cdot 10^6$  Дж/(К·м<sup>3</sup>), коэффициенты теплопроводности  $\lambda_s = 2$  Вт/(м·К),  $\lambda_h = 2,11$  Вт/(м·К),  $\lambda_l = 0,58$  Вт/(м·К),  $\lambda = 2$  Вт/(м·К), вязкость газовой фазы  $\mu_g = 10^{-5}$  кг/(м·с), удельная теплота гидратообразования  $L_h = 5 \cdot 10^5$  Дж/кг. В этом случае, как видно из рисунка, образование гидрата происходит на фронтальной

поверхности без нагрева пористой среды и образования протяженной области гидратообразования.

На Рис. 1 б) представлены распределения температуры и гидратонасыщенности при нагнетании газа под давлением  $p_e = 7$  МПа. Как следует из рисунка, образование гидрата происходит в протяженной области и сопровождается нагревом пористой среды, которое объясняется высокой интенсивностью фазовых переходов. При этом образование гидрата происходит в два этапа.

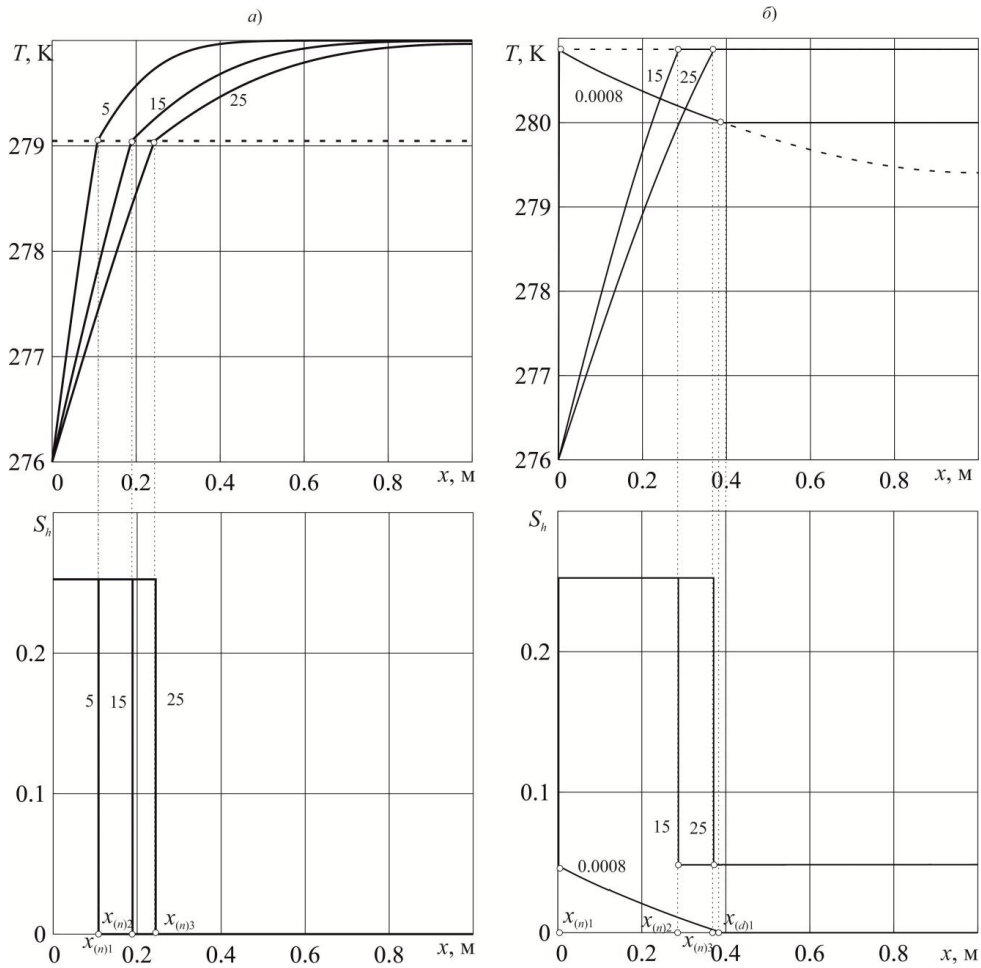


Рис. 1. Распределение температуры и гидратонасыщенности по координате  $x$  при нагнетании газа под давлением: а)  $p_e = 5$  МПа; б)  $p_e = 7$  МПа.

Численные значения на кривых — время в часах, пунктирная линия — равновесная температура

Fig. 1. Distribution of temperature and hydrate saturation at  $x$  coordinate when injecting gas under pressure: а)  $p_e = 5$  МПа; б)  $p_e = 7$  МПа.

The numerical values on the curves are the time in hours, the dotted line — the equilibrium temperature

На первом, быстром по времени, этапе происходит частичное образование в объемной зоне. В этом случае в пласте существуют три области и, соответственно, две подвижные границы. На втором этапе, когда дальняя подвижная граница достигает правой границы пласта, происходит полная гидратация пористой среды за счет теплопроводности. В результате в пласте уже существуют две области, одна из которых (ближняя) содержит газ и газогидрат, а другая (дальняя) — газ, гидрат и воду в состоянии термодинамического равновесия. При этом распределения гидратонасыщенности и температуры в трехфазной зоне со временем становятся постоянными.

На Рис. 2 а) представлены зависимости значений температуры  $T_{(n)}$  и гидратонасыщенности на ближней границе  $S_{h(n)}$  со стороны протяженной области

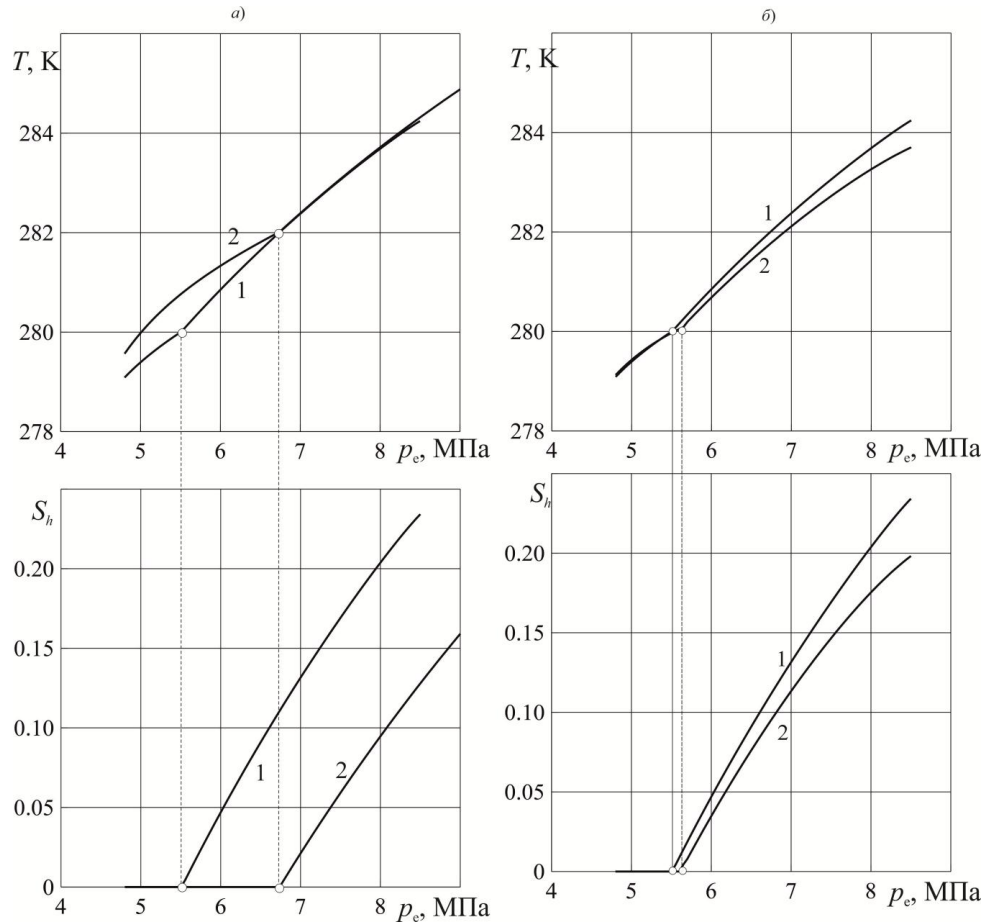


Рис. 2. Зависимость температуры и гидратонасыщенности на ближней границе (со стороны протяженной области) от давления нагнетаемого газа: а) 1 —  $T_0 = 280$  К, 2 —  $T_0 = 282$  К; б) 1 —  $k_0 = 10^{-13}$  м<sup>2</sup>, 2 —  $k_0 = 10^{-15}$  м<sup>2</sup>

Fig. 2. Temperature and hydrate saturation dependence on the near edge (from the side of the extended region) of the discharge gas pressure:

а) 1 —  $T_0 = 280$  К, 2 —  $T_0 = 282$  К; б) 1 —  $k_0 = 10^{-13}$  м<sup>2</sup>, 2 —  $k_0 = 10^{-15}$  м<sup>2</sup>



от давления нагнетаемого газа в пласт с абсолютной проницаемостью  $k_0 = 10^{-13} \text{ м}^2$ . Линии 1 и 2 соответствуют исходной температуре пласта  $T_0 = 280$  и  $282 \text{ К}$ .

Как следует из рисунка, существует такое значение давления  $p_*$  нагнетаемого газа, при превышении которого реализуется режим с повышением температуры пласта и образованием протяженной области гидратообразования. В этом случае температура на границе  $x = x_{(n)}$  поднимается выше исходной, а значения гидратонасыщенности на ней отличны от нуля.

Численными расчетами показано, что величина данного давления в высокопроницаемых пластах с большой точностью совпадает с величиной равновесного давления, соответствующего исходной температуре пласта: для  $T_0 = 280 \text{ К}$  величина  $p_* = 5,5 \text{ МПа}$ , а для  $T_0 = 282 \text{ К}$  —  $p_* = 6,7 \text{ МПа}$ . Кроме того, с увеличением давления нагнетаемого газа на границе  $x = x_{(n)}$  наблюдается увеличение величин гидратонасыщенности  $S_{h,(n)}$  и температуры  $T_{(n)}$ .

На Рис. 2 б) представлены аналогичные зависимости, что и на Рис. 2 а). Линии 1 и 2 соответствуют значениям абсолютной проницаемости пласта  $k_0 = 10^{-13}$ ,  $k_0 = 10^{-15} \text{ м}^2$ . Из рисунка следует, что если в высокопроницаемых пластах значение величины  $p_*$  совпадает с величиной равновесного давления, соответствующего исходной температуре системы, то с уменьшением абсолютной проницаемости данная величина растет.

В результате проведения численного моделирования процесса образования газогидрата в пористой среде, изначально насыщенной газом и водой, было показано, что нагнетание холодного газа может привести к нагреву пласта и образованию протяженной области гидратообразования. Также было установлено, что данный режим в высокопроницаемых пластах реализуется в тех случаях, когда величина давления нагнетаемого газа превышает величину равновесного давления, соответствующего исходной температуре пласта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бык С. Ш. Газовые гидраты / С. Ш. Бык, Ю. Ф. Макогон, В. И. Фомина. М.: Химия, 1980. 296 с.
2. Васильев В. И. Вычислительные методы в разработке месторождений нефти и газа / В. И. Васильев, В. В. Попов, Т. С. Тимофеева. Новосибирск, 2000. 127 с.
3. Истомин В. А. Газовые гидраты в природных условиях / В. А. Истомин, В. С. Якушев. М.: Недра, 1992. 235 с.
4. Хасанов М. К. Математическая модель инъекции холодного газа в пористую среду, частично насыщенную льдом / М. К. Хасанов, М. С. Доровская // Фундаментальные исследования. 2014. № 9. Ч. 4. С. 741–746.
5. Хасанов М. К. Особенности образования газогидратов при нагнетании холодного газа в пористую среду, насыщенную газом и водой / М. К. Хасанов, И. К. Гималтдинов, М. В. Столповский // Теоретические основы химических технологий. 2010. Т. 44. № 4. С. 442–449.

6. Хасанов М. К. Численное решение задачи Стефана с несколькими границами фазовых переходов методом ловли фронта в узел сетки / М. К. Хасанов, М. В. Столповский // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 11-4. С. 748–752.
7. Цыпкин Г. Г. Математическая модель диссоциации газовых гидратов, сосуществующих с газом в пластах / Г. Г. Цыпкин // *Докл. РАН*. 2001. Т. 381. № 1. С. 56–59.
8. Цыпкин Г. Г. О режимах диссоциации газовых гидратов в высокопроницаемых пластах / Г. Г. Цыпкин // *Инженерно-физический журнал*. 1992. Т. 63. № 6. С. 714–721.
9. Цыпкин Г. Г. О режимах диссоциации газовых гидратов, сосуществующих с газом в природных пластах / Г. Г. Цыпкин // *Инженерно-физический журнал*. 2001. Т. 75. № 5. С. 24–28.
10. Шагапов В. Ш. Нагнетание газа в пористый резервуар, насыщенный газом и водой / В. Ш. Шагапов, Н. Г. Мусакаев, М. К. Хасанов // *Теплофизика и аэромеханика*. 2005. Т. 12. № 4. С. 645–656.
11. Шагапов В. Ш. Нагрев пористой среды, частично заполненной газогидратом, при наличии непроницаемых границ / В. Ш. Шагапов, Л. А. Насырова // *Теплофизика высоких температур*. 1999. Т. 37. № 5. С. 784–789.
12. Шагапов В. Ш. Образование газогидрата в пористом резервуаре, частично насыщенном водой, при инъекции холодного газа / В. Ш. Шагапов, М. К. Хасанов, Н. Г. Мусакаев // *Прикладная математика и техническая физика*. 2008. Т. 49. № 3. С. 462–472.
13. Шагапов В. Ш. Численное моделирование образования газогидрата в пористой среде конечной протяженности при продувке газом / В. Ш. Шагапов, М. К. Хасанов, И. К. Гималтдинов, М. В. Столповский // *Прикладная механика и техническая физика*. 2011. Т. 52. № 4. С. 116–126.
14. Shagapov V. Sh. Formation of Gas Hydrates in a Porous Medium During an Injection of Cold Gas / V. Sh. Shagapov, N. G. Musakaev, M. K. Khasanov // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. Vol. 84. Pp. 1030–1039.

**Maxim V. STOLPOVSKII<sup>1</sup>**  
**Ekaterina P. SCHEGLOVA<sup>2</sup>**

## **ON HEATING THE POROUS MEDIA UNDER GAS HYDRATES FORMATION**

<sup>1</sup> Cand. Sci. (Phys-Math.), Senior Lecturer,  
Department of Physics,  
Ufa State Petroleum Technological University  
s\_maxim.pmm@mail.ru

<sup>2</sup> Teacher of Department of Physics,  
Ufa State Petroleum Technological University  
ekaterina-scheglova@rambler.ru

### **Abstract**

Numerical model operation of gas hydrate formation process as a result of cold gas forcing is carried out to the porous medium, which is initially saturated with gas and water. The feature of the mathematical model in this task is not only the accounting of phase changes, but also the accounting of a mass transfer in a porous medium. The necessity to consider flow of gas in a porous medium complicates the task as, though it also comes down to the Stefan's task, however, the transition temperature in this case depends on pressure. This feature is essential because, as shown in different works, it leads to the emergence of the situation when phase changes are implemented in a stretched area.

To obtain the decisions, which adequately describe the considered process for the subsequent time stages, there is a need for creation of the numerical schemes suitable for layers of terminating extent. Algorithms of the continuous account are especially widely applied to many-dimensional tasks, however, the accuracy of calculating temperature value and the position of the phase boundary strongly depends on the smoothing parameter, to define which is often difficult. In this work to solve the task the method of catching the front in a knot of a space grid is used. At the same time analytical problem solving in a self-similar approximation is used for testing the numerical algorithms based on this method.

It is shown that depending on parameters of the forced gas the hydrate formation can happen both on the frontal surface and in a stretched area. At the same time in the first case

---

**Citation:** Stolpovskii M. V., Scheglova E. P. 2016. "On Heating the Porous Media under Gas Hydrates Formation". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 2, no 2, pp. 23–35.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-23-35

---

the hydrate formation happens without heating the environment, and in the second is followed by its heating, and its size increases with pressure boost of the forced gas. By numerical calculations it is established that the mode with heating of a porous medium is implemented in high-permeability layers, when the size of pressure of the forced gas exceeds the size of the pressure balance corresponding to the initial temperature of layer.

### **Keywords**

Gas hydrates, moving boundaries of phase transitions, method of catching fronts in nodes of spatial grid.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-23-35**

### **REFERENCES**

1. Byk S. Sh., Makogon Yu. F., Fomina V. I. 1980. *Gazovye gidraty* [Gas Hydrates]. Moscow: Khimiya.
2. Istomin V. A., Yakushev V. S. 1992. *Gazovye gidraty v prirodnykh usloviyakh* [Gas Hydrates in Nature]. Moscow: Nedra.
3. Khasanov M. K., Dorovskaya M. S. 2014. “*Matematicheskaya model inzhetskii kholodnogo gaza v poristuyu sredu, chastichno nasyshchennuyu ldom*” [The Mathematical Model of Cold Gas Injection into a Porous Medium, Partially Saturated with Ice]. *Fundamental Research*, no 9, part 4, pp. 741–746.
4. Khasanov M. K., Gimaltdinov I. K., Stolpovskiy M. V. 2010. “*Osobennosti obrazovaniya gazogidratov pri nagnetanii kholodnogo gaza v poristuyu sredu, nasyshchennuyu gazom i vodoy*” [Features of Gas Hydrate Formation During the Cold Gas Injection into a Porous Medium Saturated with Gas and Water]. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, vol. 44, no 4, pp. 442–449.
5. Khasanov M. K., Stolpovskiy M. V. 2015. “*Chislennoe reshenie zadachi Stefana s neskol'kimi granitsami fazovykh perekhodov metodom lovli fronta v uzel setki*” [Numerical Solution of the Stefan Problem with Multiple Boundaries of Phase Transitions by Catching the Front Grid Node]. *Fundamental Research*, no 11-4, pp. 748–752.
6. Shagapov V. Sh., Khasanov M. K., Gimaltdinov I. K., Stolpovskiy M. V. 2011. “*Chislennoe modelirovanie obrazovaniya gazogidrata v poristoy srede konechnoy protyazhennosti pri produvke gazom*” [Numerical Simulation of Gas Hydrate Formation in Porous Media of Finite Length during the Gas Purging]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 52, no 4, pp. 116–126.
7. Shagapov V. Sh., Khasanov M. K., Musakaev N. G. 2008. “*Obrazovanie gazogidrata v poristom rezervuare, chastichno nasyshchennom vodoy, pri inzhetskii kholodnogo gaza*” [Gas Hydrate Formation in Porous Reservoir, Partly Saturated with Water during the Cold Gas Injection]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 49, no 3, pp. 462–472.
8. Shagapov V. Sh., Musakaev N. G., Khasanov M. K. 2005. “*Nagnetanie gaza v poristy rezervuar, nasyshchenny gazom i vodoy*” [Gas Injection into the Porous Reservoir Saturated with Gas and Water]. *Thermophysics and Aeromechanics*, vol. 12, no 4, pp. 645–656.

9. Shagapov V. Sh., Musakaev N. G., Khasanov M. K. 2015. "Formation of Gas Hydrates in a Porous Medium During an Injection of Cold Gas". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 84, pp. 1030–1039.
10. Shagapov V. Sh., Nasyrova L. A. 1999. "Nagrev poristoy sredy, chastichno zapolnennoy gazogidratom, pri nalichii nepronitsaemykh granits" [Heating Porous Media Partially Filled with Gas Hydrate, in the Presence of Impermeable Borders]. *High Temperature*, vol. 37, no 5, pp. 784–789.
11. Tsyarkin G. G. 1992. "O rezhimakh dissotsiatsii gazovykh gidratov v vysokopronitsaemykh plastakh" [On the Conditions of Gas Hydrates Dissociation in Highly Permeable Formations]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 63, no 6, pp. 714–721.
12. Tsyarkin G. G. 2001. "Matematicheskaya model dissotsiatsii gazovykh gidratov, sosushchestvuyushchikh s gazom v plastakh" [The Mathematical Model of Gas Hydrates Dissociation, Coexisting with Gas in Formations]. *RAS Reports*, vol. 381, no 1, pp. 56–59.
13. Tsyarkin G. G. 2001. "O rezhimakh dissotsiatsii gazovykh gidratov, sosushchestvuyushchikh s gazom v prirodnykh plastakh" [On the Dissociation Modes of Gas Hydrates Coexisting with Gas in the Natural Reservoirs]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 75, no 5, pp. 24–28.
14. Vasilyev V. I., Popov V. V., Timofeeva T. S. 2000. *Vychislitelnye metody v razrabotke mestorozhdeniy nefi i gaza* [Computational Methods in Oil and Gas Development]. Novosibirsk.