

Марат Камилович ХАСАНОВ¹

УДК 532.546, 536.421

ИНЖЕКЦИЯ ЖИДКОГО СЕРОВОДОРОДА В ПЛАСТ, НАСЫЩЕННЫЙ НЕФТЬЮ И ВОДОЙ*

¹ кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры прикладной информатики и программирования,
Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета
hasanovmk@mail.ru

Аннотация

Представлена математическая модель закачки жидкого сероводорода в природный пласт, насыщенный нефтью и водой, сопровождающейся образованием газогидрата H_2S . Для осесимметричной задачи построены и исследованы на условие термодинамической непротиворечивости автомодельные решения, описывающие распределение температуры и давления в пласте. Установлено, что в зависимости от массового расхода инжекции возможен как полный переход воды и жидкого сероводорода в газогидратное состояние на фронтальной границе, так и формирование в пласте промежуточной области, в которой вода, сероводород и его газогидрат находятся в состоянии фазового равновесия. Определены критические значения массового расхода инжекции сероводорода, соответствующие неполному переходу воды и сероводорода в газогидратное состояние. На плоскости параметров «массовый расход — начальная температура» для разных значений исходной водонасыщенности построены кривые, разделяющие различные режимы протекания процесса. Установлено, что режим с полным переходом воды и сероводорода в газогидратное состояние на фронтальной поверхности реализуется при низких значениях массового расхода, начальной температуры и водонасыщенности пласта. Показано, что возникновение промежуточной области, в которой вода, сероводород и его газогидрат находятся в состоянии фазового равновесия, в пластах с

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Республики Башкортостан (проект 17-48-020123 p_a).

Цитирование: Хасанов М. К. Инжекция жидкого сероводорода в пласт, насыщенный нефтью и водой / М. К. Хасанов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2017. Том 3. № 2. С. 72-84.
DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-2-72-84

высокими значениями начальной температуры и исходной водонасыщенности, а также при больших значениях массового расхода инъекции сероводорода обусловлено тем, что при данных условиях температура на границе гидратообразования поднимается выше равновесной температуры разложения газогидрата H_2S .

Ключевые слова

Гидратообразование, математическая модель, сероводород, автомодельное решение, пористая среда, фильтрация, нефть.

DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-2-72-84

Введение

В настоящее время в целях снижения эмиссии в атмосферу вырабатываемого промышленными объектами сероводорода практикуется его подземное захоронение в истощенных месторождениях углеводородов [13, 14]. В связи с этим одним из способов уменьшения риска выхода утилизируемых газов на поверхность представляется их перевод в газогидратное состояние, которое, по сравнению со свободным состоянием, позволяет хранить одинаковое количество газа при значительно меньших давлениях [2, 5, 10].

Результаты экспериментального исследования образования газогидратов приведены, в частности, в работах [3, 4, 12]. В этих и большинстве других аналогичных экспериментальных работ исследования проводились в реакторах, обеспечивающих быстрое повышение давления. Поэтому результаты этих исследований описывают особенности таких процессов гидратообразования, которые лимитируются их кинетикой. Поскольку скорость течений в реальных протяженных природных пластах очень мала, то интенсивность образования газогидрата в этих случаях будет лимитироваться прежде всего скоростью фильтрации в пласте. В связи с этим актуальным является построение адекватных математических моделей гидратообразования, учитывающих теплоперенос в пористой среде.

В настоящее время при математическом моделировании процессов теплопереноса в пористой среде, сопровождающихся фазовыми превращениями, как правило, используются уравнения механики сплошной среды [7]. Математические модели образования газогидратов в протяженных пористых пластах при инъекции газа сформулированы, в частности, в работах [6, 11]. Однако в данных работах закачивается тот же самый газ, который насыщает пласт в начальном состоянии. Математические модели инъекции жидкого и газообразного диоксида углерода в пласт, содержащий метан и воду в свободном состоянии, представлены в работах [8, 9]. В настоящей работе на основе методов механики сплошной среды построена математическая модель образования гидрата H_2S при закачке жидкого сероводорода в пласт, насыщенный нефтью и водой.

Постановка задачи

Условия существования газогидрата сероводорода показаны на фазовой диаграмме (рис.1) [2]. На данной диаграмме кривая gh определяет трехфазное

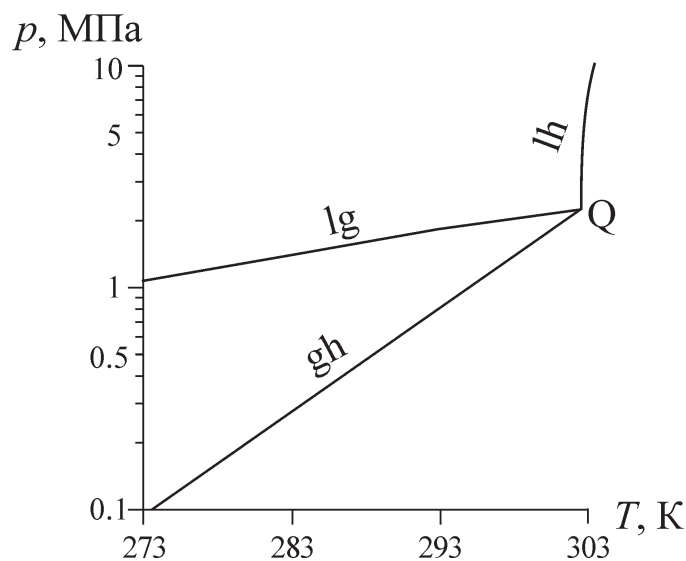


Рис. 1. Фазовая диаграмма системы «H₂S — H₂O»

Fig. 1. Phase diagram of the “H₂S — H₂O” system

равновесие между водой, газообразным сероводородом и его газогидратом, кривая *lh* — равновесие между водой, жидким сероводородом и его газогидратом, а кривая *lg* — двухфазное равновесие между жидким и газообразным сероводородом. Соответственно, газогидрат сероводорода существует левее кривых *gh* и *lh*. В квадрупольной точке *Q* (302,6 К и 2,24 МПа) все четыре указанные фазы находятся в равновесии.

Пусть горизонтальный пористый пласт в начальный момент времени насыщен водой и нефтью, давление p_0 и температура T_0 которых в исходном состоянии лежат выше кривой *lg* и левее кривой *lh* на фазовой диаграмме (т. е. в области существования смеси жидкого сероводорода и его газогидрата):

$$t = 0: T = T_0, p = p_0, S_w = S_{w0}, S_l = 1 - S_{w0}, S_h = 0, S_s = 0, \quad (1)$$

где S_j ($j = w, l, h, s$) — насыщенность пор j -й фазой (w — вода, l — нефть, h — газогидрат, s — сероводород).

Будем рассматривать случай, когда значение исходной водонасыщенности пласта не превышает 0,2, тогда воду можно считать неподвижной.

Пусть через скважину, вскрывшую пласт на всю толщину, закачивается жидкий сероводород. В данной работе будем рассматривать модель с поршневым вытеснением нефти сероводородом, а также случай, когда процесс гидратообразования лимитируется не кинетическими механизмами, а скоростью фильтрационного массопереноса в пористой среде. Это справедливо для масштабов времени, значительно превышающих характерное время кинетики процесса. Поскольку экспериментальные значения времени кинетики гидратообразования в пористых средах снижаются с уменьшением размеров пор (которые, как правило, для природных пластов не превышают 1 мкм), то эти характерные време-

на кинетики процесса очень малы по сравнению со временем распространения диоксида углерода в протяженном природном пласте. Тогда, учитывая, что в рассматриваемой задаче начальное состояние пласта соответствует условиям образования газогидрата сероводорода, т. е. молекулы сероводорода при контакте с водой почти мгновенно (по сравнению с рассматриваемыми в задаче масштабами времени) переходят в состав газогидрата, то можно полагать, что гидратообразование происходит на границе вытеснения нефти сероводородом. Следовательно, в рассматриваемом случае в пласте образуются две характерные области. В первой (ближней) области поры насыщены жидким сероводородом и его газогидратом, а во второй (дальней) области — нефтью и водой. Таким образом, с учетом указанных допущений образование газогидрата сероводорода полностью происходит на подвижной фронтальной поверхности, разделяющей эти две области.

Математическая модель

Примем следующие упрощающие предположения: пористость пласта m постоянна; скелет пористой среды, газовый гидрат и вода несжимаемы и неподвижны; температуры пористой среды и насыщающего вещества совпадают (однотемпературная модель). Гидрат является двухкомпонентной системой с массовой концентрацией сероводорода G . Поскольку сжимаемость нефти примерно в 3 раза ниже, чем у жидкого сероводорода, то жидкий сероводород будем считать упругой жидкостью, а нефть — слабосжимаемой жидкостью.

Система основных уравнений, описывающая процессы фильтрации и теплопереноса в пористой среде и представляющая собой законы сохранения масс и энергии, закон Дарси и уравнение состояния, в осесимметричном случае при отмеченных выше допущениях в каждой из областей имеет вид [11]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_i m S_i) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_i m S_i v_i) &= 0, \\ \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_i c_i m S_i v_i \frac{\partial T}{\partial r} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right), \\ m S_i v_i &= - \frac{k_i}{\mu_i} \frac{\partial p}{\partial r}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\rho_s = \rho_{0s} \exp(\beta_s (p - p_0)), \quad \rho_l = \rho_{0l} (1 + \beta_l (p - p_0)).$$

Здесь t — время; r — радиальная координата; m — пористость; p — давление; T — температура; нижние индексы $i = s, l$ относятся соответственно к параметрам сероводорода и нефти; ρ_i — плотность; k_i — фазовая проницаемость; v_i — действительная средняя скорость; c_i — удельная теплоемкость; μ_i — динамическая вязкость; β_i — коэффициент сжимаемости; ρc и λ — эффективные значения объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности насыщенного пласта. Поскольку основной вклад в значения ρc и λ вносят соответствующие параметры горной породы, то в дальнейшем будем считать их постоянными величинами.

Зависимость коэффициента фазовой проницаемости k_i от насыщенности S_i и абсолютной проницаемости k_0 зададим на основе формулы Козени [1]:

$$k_i = k_0 S_i^3 \quad (i=s, l).$$

На границе между областями выполняются соотношения, следующие из условий баланса массы и теплоты:

$$\begin{aligned} -\frac{k_s}{\mu_s} \frac{\partial p_1}{\partial r} &= m \left(\frac{\rho_h}{\rho_s} S_h G + S_s \right) V_n, \\ -\frac{k_l}{\mu_l} \frac{\partial p_2}{\partial r} &= m S_l V_n, \\ m S_h \rho_h (1-G) V_n &= m S_{w0} \rho_w V_n, \\ \lambda \frac{\partial T_1}{\partial r} - \lambda \frac{\partial T_2}{\partial r} &= m \rho_h L_h S_h V_n. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь L_h — удельная теплота образования газогидрата из жидкого сероводорода и воды; нижние индексы $j = 1, 2$ относятся соответственно к параметрам в первой и второй области; G — относительная массовая концентрация сероводорода в газогидрате; S_{w0} — начальная водонасыщенность пласта; V_n — скорость движения границы гидратообразования. Температуру и давление на этой границе будем считать непрерывными. Здесь и далее нижний индекс n относится к параметрам на границе между областями.

Из третьего уравнения системы (3) для величины гидратонасыщенности в первой области имеем:

$$S_h = \frac{\rho_w S_{w0}}{\rho_h (1-G)}.$$

Введем безразмерную величину $P_{(1)}$, равную приведенной плотности жидкого сероводорода:

$$P_{(1)} = \rho_s / \rho_{0s} = \exp(\beta_s (p_{(1)} - p_0)).$$

В рассматриваемой задаче перепады температур $\Delta T = T_e - T_0$ в области фильтрации небольшие ($\Delta T \ll T_0$). Поэтому в уравнении пьезопроводности слагаемое, отвечающее за переменность температуры, несущественно. С учетом этого, на основе системы (2), уравнения пьезопроводности и температуропроводности в каждой из областей запишутся в виде:

$$\frac{\partial P_{(1)}}{\partial t} = \chi_{(1)}^{(p)} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P_{(1)}}{\partial r} \right), \quad \frac{\partial T_{(1)}}{\partial t} = \chi_{(1)}^{(T)} X_{(1)} \frac{\partial P_{(1)}}{\partial r} \frac{\partial T_{(1)}}{\partial r} + \chi_{(1)}^{(T)} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_{(1)}}{\partial r} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial P_{(2)}}{\partial t} = \chi_{(2)}^{(p)} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P_{(2)}}{\partial r} \right), \quad \frac{\partial T_{(2)}}{\partial t} = \chi_{(2)}^{(T)} X_{(2)} \frac{\partial P_{(2)}}{\partial r} \frac{\partial T_{(2)}}{\partial r} + \chi_{(2)}^{(T)} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_{(2)}}{\partial r} \right), \quad (5)$$

где $\chi^{(T)} = \frac{\lambda}{\rho c}$, $\chi_{(1)}^{(p)} = \frac{k_s}{\mu_s m (1-S_h) \beta_s}$, $\chi_{(2)}^{(p)} = \frac{k_l}{\mu_l m (1-S_{w0}) \beta_l}$, $X_{(1)} = \frac{\rho_{0s} c_s k_s}{\lambda \mu_s \beta_s}$,

$$X_{(2)} = \frac{\rho_{0l} c_l k_l}{\lambda \mu_l \beta_s}.$$

Будем полагать, что через скважину, которая вскрыла пласт на всю его толщину, инжектируется жидкий сероводород с заданным массовым расходом Q и температурой T_e . В результате его инъекции образуется область, насыщенная сероводородом и его газогидратом. В данной работе будем рассматривать достаточно большие значения времени после начала инъекции сероводорода, при которых радиус первой зоны r_n значительно превышает радиус скважины r_e . Тогда можно полагать, что величина r_e практически не оказывает влияния на особенности протекания процесса гидратообразования в пласте. Тогда условия на скважине с учетом закона Дарси примут вид:

$$r=r_e: -\frac{2k_s \pi \rho_{0s}}{\mu_s \beta_s} \left(r \frac{\partial P_{(1)}}{\partial r} \right) = Q, \quad T=T_e \quad (r_e \rightarrow 0, t > 0).$$

Автомодельное решение

Введем автомодельную переменную: $\xi = r/\sqrt{\chi^{(T)}t}$. Для этой переменной из (4) и (5) получим решения для давления и температуры в каждой из областей:

$$P_{(1)} = P_{(n)} + \frac{Q \mu_s \beta_s}{\pi \rho_{0s} k_s} \int_{\xi}^{\xi_{(n)}} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(1)}}\right) d\xi,$$

$$T_{(1)} = T_{(n)} + \frac{(T_e - T_{(n)}) \int_{\xi}^{\xi_{(n)}} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - X_{(1)} P_{(1)}\right) d\xi}{\int_0^{\xi_{(n)}} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - X_{(1)} P_{(1)}\right) d\xi}, \quad 0 < \xi < \xi_{(n)}, \quad (6)$$

$$P_2 = P_0 + \frac{(P_{(n)} - P_0) \int_{\xi}^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}}\right) d\xi}{\int_{\xi_{(n)}}^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_{(2)}}\right) d\xi},$$

$$T_{(2)} = T_0 + \frac{(T_{(n)} - T_0) \int_{\xi}^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - X_{(2)} P_{(2)}\right) d\xi}{\int_{\xi_{(n)}}^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - X_{(2)} P_{(2)}\right) d\xi}, \quad \xi_{(n)} < \xi < \infty, \quad (7)$$

где $\eta_{(j)} = \chi_{(j)}^{(p)} / \chi^{(T)}$ ($j = 1, 2$).

На основе соотношений (3) с учетом решений для давления и температуры (6) и (7) получим уравнения для нахождения координаты границы гидратообразования $\xi_{(n)}$ и значений параметров $p_{(n)}$ и $T_{(n)}$ на ней:

$$\frac{Q\mu_s\beta_s}{\pi k_s\rho_{os}} \exp\left(-\frac{\xi_{(n)}^2}{4\eta_1}\right) = A_{(1)}P_{(n)}\xi_{(n)}^2, \quad (8)$$

$$\frac{(p_{(n)} - p_0) \exp\left(-\frac{\xi_{(n)}^2}{4\eta_2}\right)}{\int_{\xi_{(n)}}^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_2}\right) d\xi} = A_{(2)}\xi_{(n)}^2, \quad (9)$$

$$\frac{(T_{(n)} - T_e) \exp\left(-\frac{\xi_{(n)}^2}{4} - X_{(1)}P_{(n)}\right)}{\int_0^{\xi_{(n)}} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - X_{(1)}P_{(1)}\right) d\xi} - \frac{(T_0 - T_{(n)}) \exp\left(-\frac{\xi_{(n)}^2}{4} - X_{(2)}P_{(n)}\right)}{\int_{\xi_{(n)}}^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - X_{(2)}P_{(2)}\right) d\xi} = B\xi_{(n)}^2, \quad (10)$$

где $A_{(1)} = \frac{m\mu_s\beta_s\chi^{(T)}}{k_s} \left(\frac{\rho_h G S_h}{\rho_{0s}} + 1 - S_h \right)$, $A_{(2)} = \frac{m\mu_l\chi^{(T)}}{k_l} (1 - S_{w0})$, $B = \frac{m\rho_h L_h S_h}{2\rho c}$.

Записанная система уравнений в работе решалась следующим образом. Выразив из уравнения (9) величину $p_{(n)}$ (как функцию $\xi_{(n)}$) и подставив данное значение $p_{(n)}$ в уравнение (8), получаем трансцендентное уравнение с одной неизвестной $\xi_{(n)}$, которое в работе решено методом половинного деления. Затем из уравнений (9) и (10) определяем значения давления $p_{(n)}$ и температуры $T_{(n)}$ на границе $\xi_{(n)}$ между областями.

Результаты расчетов

На рис. 2 приведены распределения температуры и давления для разных значений массового расхода $Q = 0,01$ кг/(м·с) (случай *a*) и $0,05$ кг/(м·с) (случай *b*). Здесь и далее, если не оговорено иное, для параметров, характеризующих систему, приняты следующие значения: $m = 0,3$, $S_{w0} = 0,12$, $p_0 = 6$ МПа, $T_e = 292$ К, $T_0 = 294$ К, $k_0 = 2 \cdot 10^{-13}$ м², $G = 0,24$, $\lambda = 2$ Вт/(м·К), $\rho c = 2 \cdot 10^6$ Дж/(К·кг), $\mu_s = 2 \cdot 10^{-4}$ Па·с, $\mu_l = 2 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $\beta_s = 3 \cdot 10^{-9}$ Па⁻¹, $\beta_l = 1 \cdot 10^{-9}$ Па⁻¹, $\rho_h = 1003$ кг/м³, $\rho_w = 1000$ кг/м³, $\rho_{0s} = 890$ кг/м³, $\rho_{0l} = 900$ кг/м³, $c_s = 1800$ Дж/(К·кг), $c_l = 1900$ Дж/(К·кг), $L_h = 4,1 \cdot 10^5$ Дж/кг.

Из рис. 2 видно, что при низких значениях массового расхода (случай *a*) температура пласта в области, насыщенной сероводородом и его газогидратом, ниже равновесной температуры разложения газогидрата. Следовательно, в этом случае решение с фронтальной границей образования газогидрата дает адекватное математическое описание процесса. При более высоком значении массового расхода инжектируемого сероводорода (случай *b*) температура пласта на некотором участке первой области поднимается выше равновесной температу-

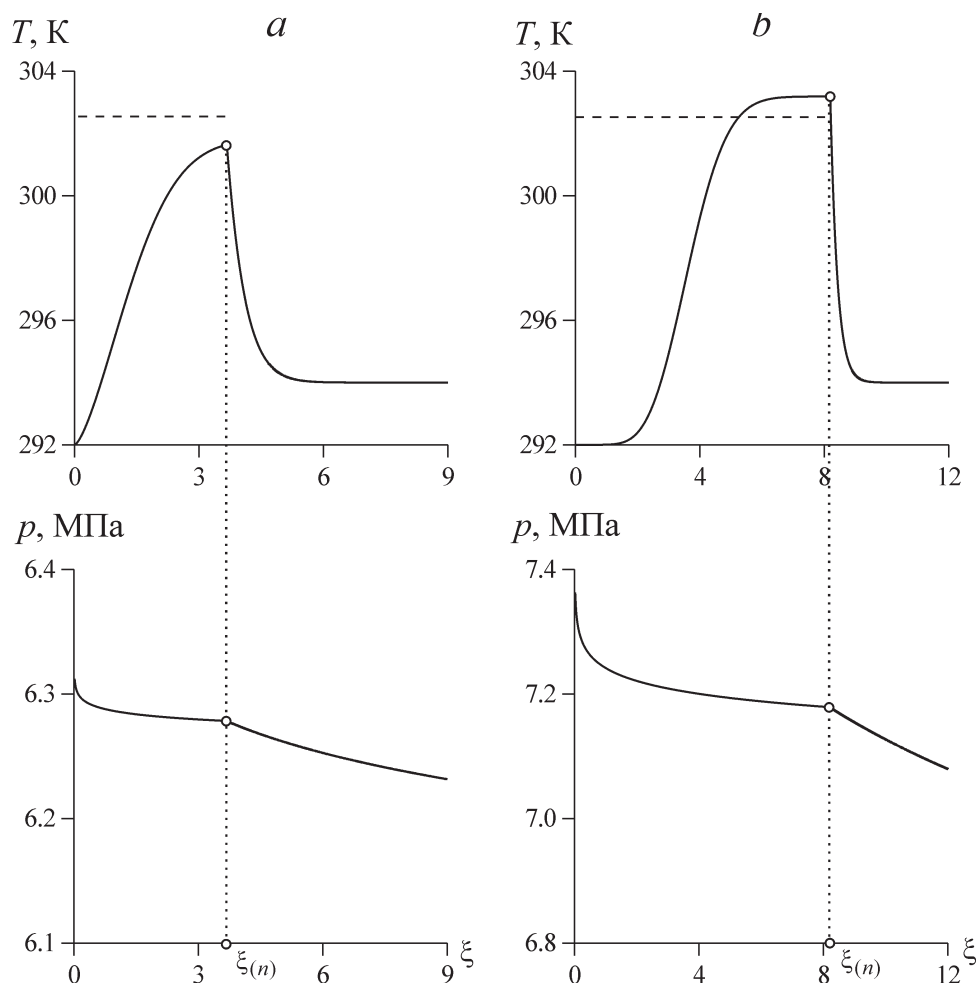


Рис. 2. Распределение температуры пласта, равновесной температуры разложения газогидрата (штриховая кривая) и давления при массовом расходе инъекции $Q = 0,01$ кг/(м·с) (а) и $0,05$ кг/(м·с) (б)

Fig. 2. The distribution of the reservoir temperature, the equilibrium decomposition temperature of the gas hydrate (dashed curve), and the pressure at the mass injection rate $Q = 0.01$ kg/(m·s) (a) and 0.05 kg/(m·s) (b)

ры разложения газогидрата H_2S . Следовательно, в этом случае будет возникать протяженная область образования газогидрата H_2S , в которой вода, жидкий сероводород и его газогидрат находятся в равновесии.

Согласно рис. 2, возникновение протяженной области образования газогидрата H_2S при достаточно высоких значениях массового расхода инъекции сероводорода обусловлено тем, что с ростом расхода происходит увеличение температуры пласта на границе образования газогидрата. Данное повышение температуры может быть объяснено тем, что с повышением расхода увеличивается скорость движения границы фазовых переходов и соответственно воз-

растает интенсивность выделения скрытой теплоты гидратообразования. При этом, поскольку температура на скважине ниже, чем температура на границе гидратообразования, то часть тепла, выделяющегося на этой границе, отводится через стенки скважины. Однако с увеличением координаты границы гидратообразования (т. е. ее удаленности от скважины) интенсивность отвода тепла через стенки скважины уменьшается, что приводит к возрастанию температуры на этой границе. Вследствие этого при достаточно больших значениях массового расхода и соответственно высокой скорости движения фронта гидратообразования температура на этом фронте может превысить равновесную температуру разложения газогидрата сероводорода.

Максимальное значение температуры на фронте образования газогидрата сероводорода можно определить следующим образом:

$$T_{(n)\max} = T_0 + \frac{m\rho_h L_h S_h}{\rho c} = T_0 + \frac{mL_h \rho_w S_{w0}}{(1-G)\rho c}. \quad (11)$$

Минимальное значение равновесной температуры образования газогидрата из жидкого сероводорода и воды, согласно рис. 1, равно значению температуры в квадрупольной точке, т. е.

$$T_{(s)\min} = 302,6.$$

Тогда необходимое условие, определяющее возможность реализации режима с протяженной областью гидратообразования, имеет вид:

$$T_0 + \frac{mL_h \rho_w S_{w0}}{(1-G)\rho c} > 302,6. \quad (12)$$

Таким образом, неполный переход воды и жидкого сероводорода в газогидратное состояние возможен только, когда начальная температура пласта, его пористость и водонасыщенность удовлетворяют условию (12). В этом случае неполный переход воды и жидкого сероводорода в газогидратное состояние реализуется при таких значениях массового расхода инъекции, когда температура пласта на фронте фазовых переходов $T_{(n)}$ превышает равновесную температуру образования газогидрата сероводорода $T_{(s)}$:

$$T_{(n)} > T_{(s)}.$$

На основе данного неравенства были проведены расчеты для определения критического значения расхода инъекции сероводорода Q^* , выше которого реализуется режим с протяженной областью гидратообразования.

На рис. 3 приведена зависимость критического значения массового расхода инъекции сероводорода от начальной температуры пласта для двух разных начальных водонасыщенностей пласта $S_{w0} = 0,12$ (кривая 1) и $S_{w0} = 0,13$ (кривая 2). Видно, что с понижением начальной температуры и водонасыщенности пласта величина критического значения массового расхода возрастает. Это обусловлено тем, что в этом случае, согласно (11), уменьшается температура пласта на границе образования газогидрата сероводорода. Поэтому для того чтобы температура пласта на этой границе превысила равновесную температуру разло-

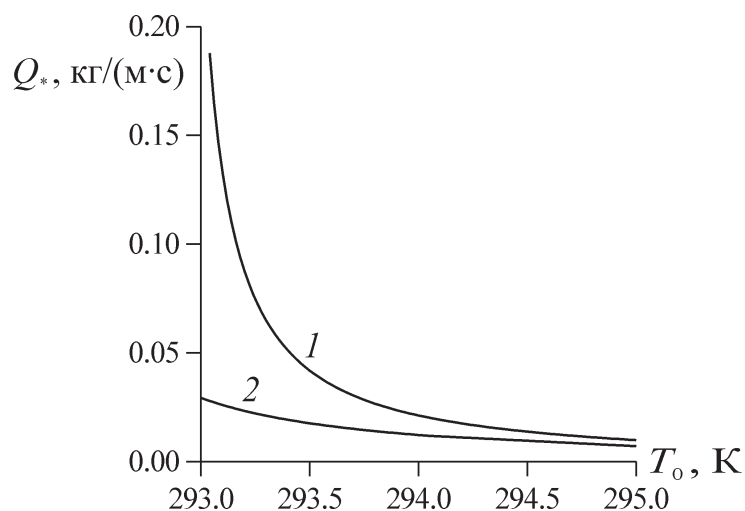


Рис. 3. Зависимость критического значения массового расхода инъекции сероводорода от начальной температуры пласта при начальной водонасыщенности $S_{w0} = 0,12$ (кривая 1) и $S_{w0} = 0,13$ (кривая 2)

Fig. 3. Dependence of the critical value of the mass flow rate of hydrogen sulfide injection on the initial formation temperature for the initial water saturation $S_{w0} = 0.12$ (curve 1) and $S_{w0} = 0.13$ (curve 2)

жения газогидрата сероводорода, необходимы высокая интенсивность выделения скрытой теплоты гидратообразования и низкая интенсивность отвода тепла через стенки скважины, что реализуется при больших значениях массового расхода и, соответственно, скорости движения границы фазовых переходов.

Заключение

Получены автомодельные решения задачи об образовании газогидрата сероводорода при инъекции жидкого сероводорода в пласт, насыщенный нефтью и водой. Установлено, что образование газогидрата в пласте происходит либо на фронтальной поверхности, либо в протяженной области. Показано, что режим с протяженной областью гидратообразования реализуется при высоких значениях массового расхода, начальной температуры и водонасыщенности пласта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баренблатт Г. И. Движение жидкостей и газов в природных пластах / Г. И. Баренблатт, В. М. Ентов, В. М. Рыжик. М.: Недра, 1982. 211 с.
2. Бык С. Ш. Газовые гидраты / С. Ш. Бык, Ю. Ф. Макогон, В. И. Фомина. М.: Химия, 1980. 296 с.
3. Донцов В. Е. Ударные волны и образование гидрата углекислого газа при повышенном начальном давлении в газожидкостной среде / В. Е. Донцов, А. А. Чернов,

- Е. В. Донцов // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Том 14. № 1. С. 23-39.
DOI: 10.1134/S0869864307010040
4. Донцов В. Е. Процессы растворения и гидратообразования за ударной волной в газожидкостной смеси / В. Е. Донцов, А. А. Чернов // Доклады академии наук. 2009. Т. 425. № 6. С. 764-768. DOI: 10.1134/S1028335809040144
 5. Дучков А. Д. Оценка возможности захоронения углекислого газа в криолитозоне Западной Сибири / А. Д. Дучков, Л. С. Соколова, Д. Е. Аюнов, М. Е. Пермяков // Криосфера Земли. 2009. Том 13. № 4. С. 62-68.
 6. Хасанов М. К. Исследование режимов образования газогидратов в пористой среде, частично насыщенной льдом / М. К. Хасанов // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Том 22. № 2. С. 255-266. DOI: 10.1134/S0869864315020109
 7. Цыпкин Г. Г. Течения с фазовыми переходами в пористых средах / Г. Г. Цыпкин. М.: Физматлит, 2009. 232 с.
 8. Цыпкин Г. Г. Образование гидрата углекислого газа при его инъекции в истощенное месторождение углеводородов / Г. Г. Цыпкин // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2014. № 6. С. 101-108. DOI: 10.1134/S0015462814060106
 9. Цыпкин Г. Г. Образование гидрата при инъекции жидкой двуокиси углерода в пласт, насыщенный метаном и водой / Г. Г. Цыпкин // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2016. № 5. С. 99-107. DOI: 10.7868/S0568528116050157
 10. Чувилин Е. М. Экспериментальное изучение образования гидратов CO_2 в поровом пространстве промерзающих и мерзлых пород / Е. М. Чувилин, О. М. Гурьева // Криосфера Земли. 2009. Том 13. № 3. С. 70-79.
 11. 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 механика и техническая физика. 2008. Том 49. № 3. С. 462-472. DOI: 10.1007/s10808-008-0062-y
 12. Dontsov V. E. Dilution and Hydrate Forming Process in Shock Waves / V. E. Dontsov, A. A. Chernov // International Journal of Heat Mass Transfer. 2009. Vol. 52. No 21-22. Pp. 4919-4928. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.04.030
 13. Machel H. G. Geological and Hydrogeological Evaluation of the Nisku Q-Pool in Alberta, Canada, for H_2S and/or CO_2 Storage / H. G. Machel // Oil and Gas Science and Technology. 2005. Vol. 60. Pp. 51-65. DOI: 10.2516/ogst:2005005
 14. Xu T. Numerical Modeling of Injection and Mineral Trapping of CO_2 with H_2S and SO_2 in a Sandstone Formation / T. Xu, J. A. Apps, K. Pruess, H. Yamamoto // Chemical Geology. 2007. Vol. 242. No 3-4. Pp. 319-346. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2007.03.022

Marat K. KHASANOV¹

INJECTION OF LIQUID HYDROGEN SULFIDE IN A LAYER SATURATED WITH OIL AND WATER*

¹ Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor,
Department of Applied Informatics and Programming,
Sterlitamak Branch of Bashkir State University
hasanovmk@mail.ru

Abstract

A mathematical model of the injection of liquid hydrogen sulfide into a natural reservoir saturated with oil and water accompanied by the formation of H₂S gas hydrate is presented. For the axisymmetric problem, self-similar solutions describing the temperature and pressure distribution in the reservoir are constructed and investigated for the thermodynamic consistency condition. It is established that depending on the mass flow rate of injection, both a complete transition of water and liquid hydrogen sulfide to the gas hydrate state on the frontal boundary is possible, as well as formation of an intermediate region in the formation in which water, hydrogen sulfide and its gas hydrate are in a state of phase equilibrium. Critical values of the mass flow rate of hydrogen sulfide injection corresponding to the incomplete transfer of water and hydrogen sulfide to the gas hydrate state are determined. On the plane of the parameters “mass flow rate — initial temperature” curves for different values of the initial water saturation are plotted separating different flow regimes of the process. It has been established that the regime with complete transition of water and hydrogen sulfide to the gas hydrate state on the frontal surface is realized at low values of mass flow, initial temperature and water saturation of the formation. It is shown that the formation of an intermediate region in which water, hydrogen sulfide and its gas hydrate are in a state of phase equilibrium, in formations with high initial temperature and initial water saturation, and also at high values of mass flow rate of hydrogen sulfide injection is due to the fact that under given conditions, the temperature at the hydrate formation boundary rises above the equilibrium decomposition temperature of H₂S gas hydrate.

* This research was supported by Russian Foundation for Basic Research and the Republic of Bashkortostan (project number 17-48-020123 p_a).

Citation: Khasanov M. K. 2017. “Injection of Liquid Hydrogen Sulfide in a Layer Saturated with Oil and Water”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 3, no 2, pp. 72-84.
DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-2-72-84

Keywords

Hydrate formation, mathematical model, hydrogen sulfide, self-similar solution, porous medium, filtration, oil.

DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-2-72-84

REFERENCES

1. Barenblatt G. I., Entov V. M., Ryzhik V. M. 1982. *Dvizhenie zhidkostej i gazov v prirodnyh plastah* [Movement of Liquids and Gases in Natural Formations]. Moscow: Nedra.
2. Byk S. Sh., Makogon Yu. F., Fomina V. I. 1980. *Gazovye gidraty* [Gas Hydrates]. Moscow: Khimiya.
3. Dontsov V. E., Chernov A. A., Dontsov E. V. 2007. "Shock Waves and Formation of Carbon Dioxide Hydrate at an Increased Pressure in the Gas-Liquid Medium". *Thermophysics and Aeromechanics*, vol. 14, no 1, pp. 21-35. DOI: 10.1134/S0869864307010040
4. Dontsov V. E., Chernov A. A. 2009. "Dissolution and Hydrate-Formation Processes behind the Shock Wave in a Gas-Liquid Mixture". *Doklady Physics*, vol. 54, no 4, pp. 215-219. DOI: 10.1134/S1028335809040144
5. Duchkov A. D., Sokolova L. S., Ayunov D. E., Permyakov M. E. 2009. "Assessment of Potential of West Siberian Permafrost for the Carbon Dioxide Storage". *Earth's Cryosphere*, vol. 13, no 4, pp. 62-68.
6. Khasanov M. K. 2015. "Investigation of Regimes of Gas Hydrate Formation in a Porous Medium, Partially Saturated with Ice". *Thermophysics and Aeromechanics*, vol. 22, no 2, pp. 245-255. DOI: 10.1134/S0869864315020109
7. Tsyppin G. G. 2009. *Techeniya s fazovymi perehodami v poristyh sredah* [Flows with Phase Transitions in Porous Media]. Moscow: Fizmatlit.
8. Tsyppin G. G. 2014. "Formation of Carbon Dioxide Hydrate at the Injection of Carbon Dioxide into a Depleted Hydrocarbon Field". *Fluid Dynamics*, vol. 49, no 6, pp. 789-795.
9. Tsyppin G. G. 2016. "Formation of Hydrate in Injection of Liquid Carbon Dioxide into a Reservoir Saturated with Methane and Water". *Fluid Dynamics*, vol. 51, no 5, pp. 672-679. DOI: 10.1134/S0015462816050112
10. Chuvilin E. M., Guryeva O. M. 2009. "Experimental Investigation of CO₂ Gas Hydrate Formation in Porous Media of Frozen and Freezing Sediments". *Earth's Cryosphere*, vol. 13, no 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*, vol. 49, no 3, pp. 462-472.
12. Dontsov V. E., Chernov A. A. 2009. "Dilution and Hydrate Forming Process in Shock Waves". *International Journal of Heat Mass Transfer*, vol. 52, no 21-22, pp. 4919-4928.
13. Machel H. G. 2005. "Geological and Hydrogeological Evaluation of the Nisku Q-Pool in Alberta, Canada, for H₂S and/or CO₂ Storage". *Oil and Gas Science and Technology*, vol. 60, pp. 51-65. DOI: 10.2516/ogst:2005005
14. Xu T., Apps J. A., Pruess K., Yamamoto H. 2007. "Numerical Modeling of Injection and Mineral Trapping of CO₂ with H₂S and SO₂ in a Sandstone Formation". *Chemical Geology*, vol. 24, no 3-4, pp. 319-346. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2007.03.022