

УДК 532.546:536.421

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКАЧКИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ИСТОЩЕННОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ УГЛЕВОДОРОДОВ

Хасанов Марат Камилович,
hasanovmk@mail.ru

Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета,
Россия, 453103, г. Стерлитамак, пр. Ленина, 37.

В настоящее время подземная утилизация выработанного промышленными объектами углекислого газа видится одним из направлений решения проблемы предотвращения дальнейшего повышения концентрации парниковых газов в атмосфере Земли. При этом наиболее безопасным и надежным методом предотвращения выхода парниковых газов на поверхность является их перевод в газогидратное состояние, позволяющее хранить огромное количество газа в небольшом объеме и при небольших значениях давления.

Целью работы является теоретическое исследование гидродинамических и теплофизических процессов при подземной утилизации парниковых газов в газогидратном состоянии.

На основе методов механики сплошной среды построена математическая модель закачки углекислого газа в природный пласт, насыщенный в исходном состоянии водой и метаном, сопровождающейся гидратообразованием. Для случая инъекции теплового углекислого газа (с температурой, превышающей начальную температуру пласта) построены автоматические решения плоско-радиальной задачи, описывающие динамику температурных и гидродинамических полей в пласте.

В результате численных расчетов установлено, что образование газового гидрата диоксида углерода может происходить как на фронтальной поверхности, так и в протяженной зоне. Определены предельные значения массового расхода инъекции углекислого газа, соответствующие возникновению протяженной зоны образования газового гидрата. Показано, что режим с образованием газогидрата в протяженной области реализуется при малых значениях массового расхода, а также при высоких значениях проницаемости и начальной водонасыщенности пласта. Реализация режима с протяженной областью гидратообразования в пластах с высокими значениями проницаемости и исходной водонасыщенности, а также при малых значениях расхода обусловлена тем, что при данных условиях давление на границе фазовых переходов оказывается ниже равновесного давления образования газогидрата углекислого газа, соответствующего температуре на этой границе.

Ключевые слова:

Пористая среда, газогидраты, углекислый газ, фильтрация, гидратообразование.

Введение

В настоящее время в рамках борьбы с глобальным потеплением изучается потенциальная возможность подземного захоронения выработанного промышленными объектами углекислого газа [1–7]. Поскольку при долгосрочном хранении углекислого газа в виде флюида существует опасность его эмиссии в атмосферу, то в настоящее время изучается возможность подземного захоронения углекислого газа в газогидратном состоянии [8, 9]. Поскольку при одинаковых условиях в единице объема газогидрата содержится значительно больше газа, чем в свободном состоянии, то газогидратное состояние позволяет хранить большое количество углекислого газа при относительно низких давлениях [10, 11]. Это позволяет уменьшить риск выхода углекислого газа на поверхность и фактически увеличить емкость подземных резервуаров для хранения диоксида углерода. Кроме того, в природных пористых пластах площадь контакта воды и газа принимает огромные значения. Это свойство пористых сред благоприятно для интенсификации процесса образования гидрата и позволяет относительно быстро и экономично осуществить перевод углекислого газа в газогидратное состояние, например, путем его закачки в отработанные нефтяные или газовые коллекторы, частично насыщенные водой. Поскольку соответствующие технологические идеи должны быть подкреплены расчетами и

обоснованными теоретическими моделями, то актуальным является построение математических моделей указанных процессов.

Некоторые закономерности процессов гидратообразования в случае прямолинейно-параллельных течений в пористой среде рассмотрены в работах [12–15]. В данной работе в осесимметричном случае исследуется инъекция теплового углекислого газа (с температурой, превышающей начальную температуру пласта) в природный пласт, сопровождающаяся образованием его газогидрата.

Постановка задачи

Положим, что углекислый газ через скважину инжектируется в горизонтальный пористый пласт, насыщенный в начальный момент времени водой с исходной насыщенностью S_{j0} и метаном, давление p_0 и температура T_0 которых соответствуют термодинамическим условиям существования газогидрата углекислого газа.

Равновесные значения температуры T и давления p образования газогидрата достаточно хорошо описываются уравнением [11]:

$$T = T_0 + T_* \ln(p/p_{s,0}), \quad (1)$$

где $p_{s,0}$ – соответствующее температуре T_0 равновесное давление, Па; T_* – эмпирический параметр, К.

С учетом (1) начальное термобарическое состояние пласта удовлетворяет условиям:

$$t=0: T=T_0, p=p_0, p_0 > p_{s,0}, (r > 0, t=0).$$

В данной работе будем рассматривать 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. Экспериментальные значения времени кинетики гидратообразования в пористых средах сильно зависят от характерных размеров пор, но в среднем составляют порядка нескольких часов. Так, в работе [16], в которой исследовалось образование и разложение гидрата углекислого газа в пористой среде, данное время составило порядка одного часа. Эти характерные времена, как правило, очень малы по сравнению со временем распространения диоксида углерода в протяженном природном пласте.

В рассматриваемой задаче будем пренебрегать диффузионным перемешиванием углекислого газа и метана, т. к. вследствие непрерывной закачки диоксида углерода в пласт интенсивность массопереноса, обусловленного фильтрацией в проницаемой пористой среде, значительно превышает интенсивность массопереноса, обусловленного диффузией [13]. Кроме того, фронт вытеснения метана диоксидом углерода можно считать устойчивым вследствие ламинарного характера течений в пористых средах, а также большей по сравнению с метаном вязкостью углекислого газ [14]. Тогда, учитывая, что в рассматриваемой задаче начальное состояние пласта соответствует условиям образования газогидрата диоксида углерода, можно полагать, что образование газогидрата диоксида углерода происходит на границе вытеснения метана углекислым газом. Следовательно, в рассматриваемом случае в пласте образуются две характерные области. В первой (ближней) области ($j=1$) поры насыщены углекислым газом и его газогидратом, а во второй (дальней) области ($j=2$) – метаном и водой. Соответственно газогидрат диоксида углерода образуется из углекислого газа и воды на подвижной межфазной поверхности, разделяющей первую и вторую области.

Основные уравнения

Система основных уравнений, описывающая процессы тепломассопереноса в пласте и представляющая собой законы сохранения масс и энергии, закон Дарси и уравнение состояния, в плоско-радиальном случае в каждой из областей имеет вид [17, 18]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \phi S_i) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho_i \phi S_i v_i) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho C T) + \rho_i C_i \phi S_i v_i \frac{\partial T}{\partial r} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right), \\ \phi S_i v_i &= - \frac{k_i}{\mu_i} \frac{\partial p}{\partial r}, \\ \rho_i &= p / R_{gi} T. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь t – время, с; r – радиальная координата, м; ϕ – пористость, д. ед; p – давление, Па; T – температура, К; нижние индексы $i=d, m$ относятся соответственно к параметрам углекислого газа и метана; ρ_i – плотность, кг/м³; k_i – фазовая проницаемость, м²; v_i – действительная средняя скорость газа, м/с; C_i – удельная теплоемкость, Дж/(К·кг); μ_i – динамическая вязкость газа, Па·с; R_{gi} – газовая постоянная, Дж/(К·кг); S_i – насыщенность пор пласта газом, д. ед; ρC и λ – эффективные значения объемной теплоемкости, Дж/(К·м³) и коэффициента теплопроводности, Вт/(м·К) для пласта, насыщенного газом, водой или газогидратом. Поскольку основной вклад в значения ρC и λ вносят соответствующие параметры горной породы, то в дальнейшем будем считать их постоянными величинами.

В данной работе будем рассматривать случай, когда исходная водонасыщенность пласта не превышает 0,2 и поэтому подвижностью воды можно пренебречь.

Зависимость коэффициента фазовой проницаемости k_i для углекислого газа и метана от их насыщенности S_i и абсолютной проницаемости пласта k_0 можно задать на основе формулы Козени [19]:

$$k_i = k_0 S_i^3 \quad (i = d, m).$$

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

$$\begin{aligned} - \frac{k_d}{\mu_d} \frac{\partial p_1}{\partial r} &= \phi \left(\frac{\rho_h}{\rho_d} S_h G + S_d \right) V_n, \\ - \frac{k_m}{\mu_m} \frac{\partial p_2}{\partial r} &= \phi S_m V_n, \\ \phi S_h \rho_h (1 - G) V_n &= \phi S_{i0} \rho_i V_n, \\ \lambda \frac{\partial T_1}{\partial r} - \lambda \frac{\partial T_2}{\partial r} &= \phi \rho_h L_h S_h V_n. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь ρ_h и ρ_i – плотность газогидрата и воды, кг/м³; S_h – насыщенность пор пласта газогидратом, д. ед.; L_h – удельная теплота образования газогидрата углекислого газа, Дж/кг; нижние индексы $j=1, 2$ относятся соответственно к параметрам в первой и второй области; S_i – насыщенность пор водой, д. ед.; G – относительная массовая концентрация углекислого газа в газогидрате, д. ед.; V_n – скорость движения границы гидратообразования, м/с. 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:

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

Будем полагать, что через скважину, которая вскрыла пласт на всю его толщину, с заданным

массовым расходом Q и температурой T_w инжeksiруется углекислый газ. В результате его инжeksiции образуется область, насыщенная углекислым газом и его газогидратом. В данной работе будем рассматривать достаточно большие значения времени после начала инжeksiции углекислого газа, при которых радиус первой зоны r_n значительно превышает радиус скважины r_w . Тогда можно полагать, что величина r_w практически не оказывает влияния на особенности протекания процесса гидратообразования в пласте. Тогда условия на стенках скважины с учетом закона Дарси можно записать в виде:

$$r = r_w : -\frac{k_d \pi}{\mu_d R_{gd} T_w} \left(r \frac{\partial p^2}{\partial r} \right) = Q,$$

$$T = T_w \quad (r_w \rightarrow 0, t > 0),$$

где Q – массовый расход инжeksiции углекислого газа, кг/(м·с).

На основе системы (2) можно получить уравнения теплопроводности и пьезопроводности и в виде:

$$\frac{\partial p_j^2}{\partial t} = \chi_j^{(p)} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p_j^2}{\partial r} \right),$$

$$\frac{\partial T_j}{\partial t} = \chi^{(T)} X_j \frac{\partial p_j^2}{\partial r} \frac{\partial T_j}{\partial r} + \chi^{(T)} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_j}{\partial r} \right), \quad (4)$$

где

$$\chi_1^{(p)} = \frac{k_d p_1}{\mu_d \phi (1 - S_h)}, \quad \chi_2^{(p)} = \frac{k_m p_2}{\mu_m \phi (1 - S_{l0})},$$

$$X_1 = \frac{\rho_d C_d}{2\lambda} \frac{k_d}{\mu_d p_1}, \quad X_2 = \frac{\rho_m C_m}{2\lambda} \frac{k_m}{\mu_m p_2}, \quad \chi^{(T)} = \frac{\lambda}{\rho C}.$$

Начальные условия имеют вид:

$$t=0: T=T_0, p=p_0 \quad (r>0, t=0).$$

Автомодельное решение

Введем автомодельную переменную:

$$\xi = r / \sqrt{\chi^{(T)} t}.$$

Для этой переменной уравнения пьезопроводности и теплопроводности (4) примут вид:

$$-\xi \frac{dp_j^2}{d\xi} = 2 \frac{\chi_j^{(p)}}{\chi^{(T)}} \frac{1}{\xi} \frac{d}{d\xi} \left(\xi \frac{dp_j^2}{d\xi} \right), \quad (j=1,2),$$

$$-\xi \frac{dT_j}{d\xi} = 2 X_j \frac{dp_j^2}{d\xi} \frac{dT_j}{d\xi} + \frac{2}{\xi} \frac{d}{d\xi} \left(\xi \frac{dT_j}{d\xi} \right). \quad (5)$$

Здесь уравнение пьезопроводности является нелинейным уравнением, т. к. в коэффициент пьезопроводности $\chi_j^{(p)}$ входит неизвестная функция p_j . Рассматривая случай небольших перепадов давления в пласте, можно применить линеаризацию Лейбениона [20], т. е. переменное давление p_j в параметре $\chi_j^{(p)}$ принять постоянным и равным исходному пластовому давлению p_0 .

После интегрирования уравнений пьезопроводности и теплопроводности (5) решение для распре-

деления давления и температуры в каждой из областей может быть записано в виде:

$$p_1^2 = p_n^2 + \frac{Q \mu_d R_{gd} T_n}{\pi k_d} \int_{\xi}^{\xi_n} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_1}\right) d\xi,$$

$$(T_w - T_n) \int_{\xi}^{\xi_n} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - X_1 p_1^2\right) d\xi$$

$$T_1 = T_n + \frac{\int_{\xi}^{\xi_n} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - X_1 p_1^2\right) d\xi}{\int_0^{\xi_n} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - X_1 p_1^2\right) d\xi},$$

$$0 < \xi < \xi_n, \quad (6)$$

$$(p_n^2 - p_0^2) \int_{\xi}^{\xi_n} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_2}\right) d\xi$$

$$p_2^2 = p_0^2 + \frac{\int_{\xi}^{\xi_n} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_2}\right) d\xi}{\int_{\xi_n}^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_2}\right) d\xi},$$

$$(T_n - T_0) \int_{\xi}^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - X_2 p_2^2\right) d\xi$$

$$T_2 = T_0 + \frac{\int_{\xi}^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - X_2 p_2^2\right) d\xi}{\int_{\xi_n}^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - X_2 p_2^2\right) d\xi},$$

$$\xi_n < \xi < \infty, \quad (7)$$

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:

$$\frac{Q \mu_d R_{gd} T_w}{\pi k_d} \exp\left(-\frac{\xi_{(n)}^2}{4\eta_1}\right) = A_1 p_n \xi_n^2, \quad (8)$$

$$(p_n^2 - p_0^2) \exp\left(-\frac{\xi_n^2}{4\eta_2}\right) = A_2 p_n \xi_n^2,$$

$$\int_{\xi_n}^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_2}\right) d\xi \quad (9)$$

$$(T_n - T_w) \exp\left(-\frac{\xi_n^2}{4} - X_1 p_n^2\right) =$$

$$\frac{\int_0^{\xi_n} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - X_1 p_n^2\right) d\xi}{\int_{\xi_n}^{\infty} \frac{1}{\xi} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - X_2 p_n^2\right) d\xi} = B \xi_n^2, \quad (10)$$

где

$$A_1 = \frac{\phi \mu_d \chi^{(T)}}{k_d} \left(\frac{\rho_h G S_h}{\rho_{0d}} + 1 - S_h \right),$$

$$A_2 = \frac{\phi \mu_m \chi^{(T)}}{k_m} (1 - S_{l0}), \quad B = \frac{\phi \rho_h L_h S_h}{2\rho C}.$$

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

Результаты расчетов

Полученные решения исследовались на выполнение термодинамического условия существования в первой области газогидрата диоксида углерода, которое состоит в том, что локальное давление в первой области должно быть выше равновесного давления образования газогидрата углекислого газа, вычисляемого из формулы (1) по найденному в процессе решения распределению температуры.

На рис. 1 представлены распределения температуры и давления в пласте при двух разных значениях расхода закачки углекислого газа $Q=0,03$ кг/(м·с) (a) и $0,01$ кг/(м·с) (b). Для остальных

параметров приняты следующие значения: $\phi=0,2$, $S_{i0}=0,1$, $p_0=2,9$ МПа, $T_w=278$ К, $T_0=276$ К, $k_0=10^{-14}$ м², $G=0,28$, $\lambda=2$ Вт/(м·К), $\rho C=2,5 \cdot 10^6$ Дж/(К·кг), $\rho_h=1100$ кг/м³, $C_d=890$ Дж/(К·кг), $C_m=1560$ Дж/(К·кг), $R_{gd}=189$ Дж/(К·кг), $R_{gm}=520$ Дж/(К·кг), $\mu_d=1,3 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\mu_m=10^{-5}$ Па·с, $L_h=4 \cdot 10^5$ Дж/кг, $T_*=7,6$ К, $p_{s0}=1,68$ МПа.

Из рисунок видно, что при более высоком значении расхода закачки углекислого газа (a) давление пласта (сплошная линия) в первой области выше равновесного давления образования газогидрата углекислого газа (штриховая линия). Следовательно, в этом случае решение с фронтальной поверхностью гидратообразования адекватно описывает процесс. При меньшем значении расхода закачиваемого углекислого газа (b) давление пласта на некотором узком участке первой области опускается ниже равновесного давления образования газогидрата диоксида углерода, что соответствует возникновению протяженной области образования газогидрата диоксида углерода.

Возможность реализации режима с протяженной областью гидратообразования обусловлена нагревом пласта вследствие выделения скрытой те-

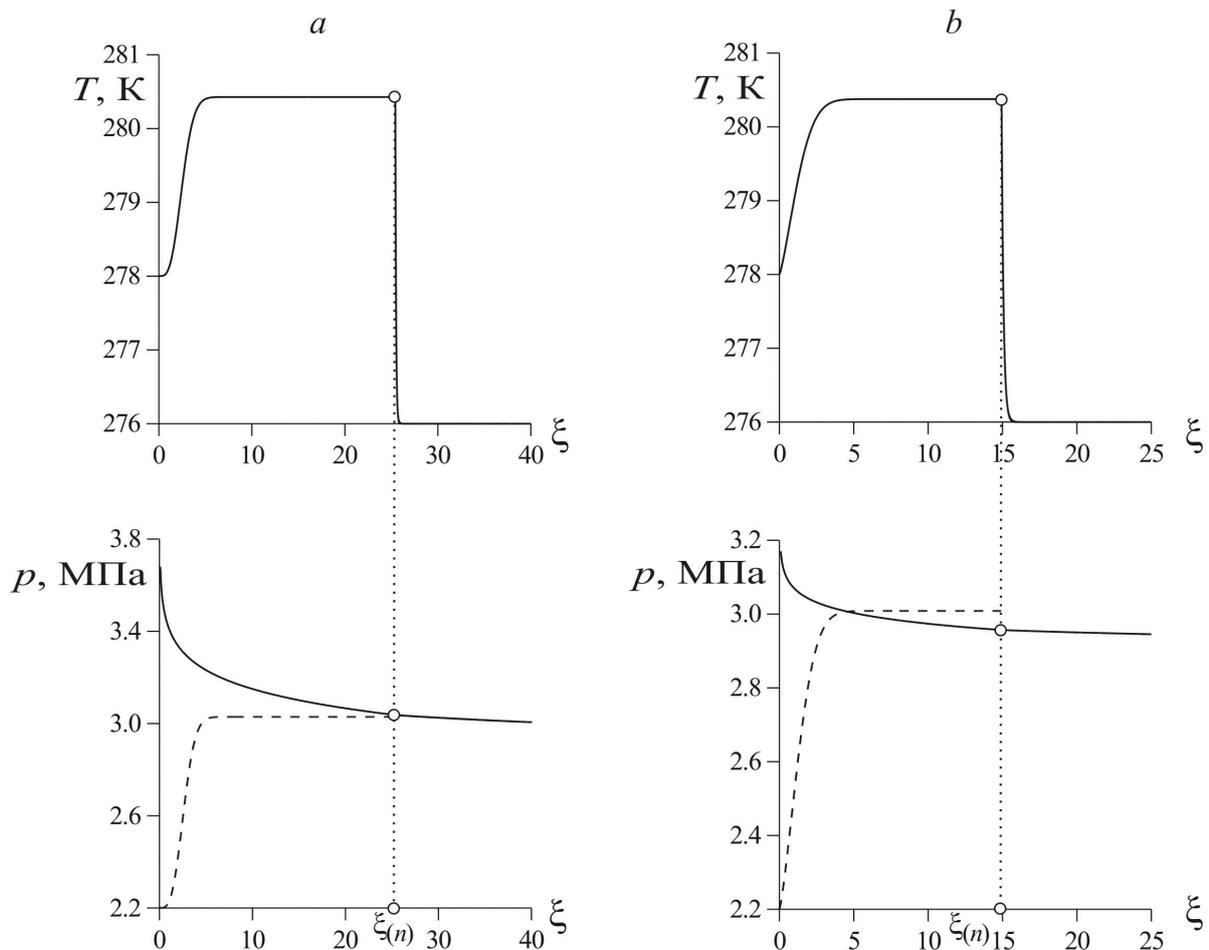


Рис. 1. Распределение температуры, давления и равновесного давления (штриховая кривая) при инъекции углекислого газа с расходом $0,03$ кг/(м·с) (a) и $0,01$ кг/(м·с) (b)

Fig. 1. Distribution of temperature, pressure and equilibrium pressure (dashed curve) when carbon dioxide is injected at a flow rate of $0,03$ kg/(m·s) (a) and $0,01$ kg/(m·s) (b)

плоты гидратообразования. Значение температуры на межфазной границе можно приближенно оценить следующим образом:

$$T_{(n)\max} = T_0 + \phi \rho_h L_h S_h / \rho C = T_0 + \frac{\phi L_h \rho_l S_{l0}}{(1-G)\rho C}.$$

Минимальное значение для величины равновесной температуры образования газогидрата углекислого газа определяется выражением:

$$T_s = T_0 + T_* \ln(p_0/p_{s0}),$$

где T_s – температура образования газогидрата углекислого газа, вычисляемая по формуле (1) и соответствующая давлению p_0 .

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

$$T_* \ln(p_0/p_{s0}) < \frac{\phi L_h \rho_l S_{l0}}{(1-G)\rho C}.$$

Исследуем более детально критические условия, определяющие возможность реализации того или иного режима протекания процесса в случае, когда пористость, а также начальные давление и водонасыщенность пласта удовлетворяют данному неравенству.

Необходимое и достаточное условие реализации режима с протяженной областью гидратообразования определяется неравенством:

$$T_s < T_n,$$

где T_n – температура на границе гидратообразования, определяемая из уравнения (10).

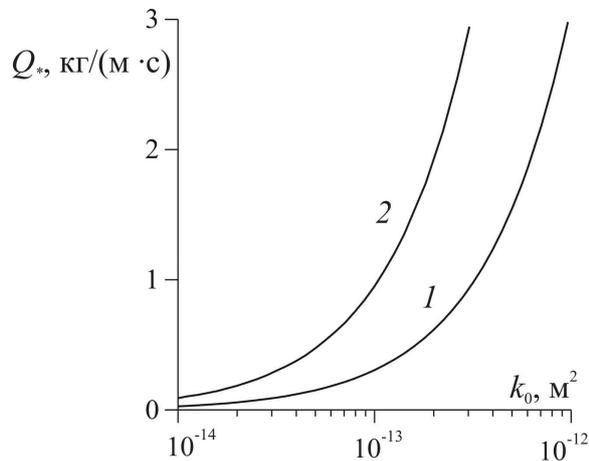


Рис. 2. Зависимость предельного значения расхода от проницаемости при $S_0=0,10$ (кривая 1) и $S_0=0,11$ (кривая 2)

Fig. 2. Limit mass flow rate versus the permeability for $S_0=0,10$ (curve 1) and $S_0=0,11$ (curve 2)

На основе указанного неравенства были проведены численные расчеты для определения предельного значения расхода инъекции углекислого газа Q_s , ниже которого реализуется режим с протяженной областью гидратообразования.

На рис. 2 приведена зависимость предельного значения расхода закачиваемого углекислого газа от проницаемости пласта при разных значениях начальной водонасыщенности пласта $S_{l0}=0,10$ (кривая 1) и $S_{l0}=0,11$ (кривая 2). Значения остальных параметров соответствуют рис. 1. Из рис. 2 видно, что с повышением проницаемости пласта предельное значение расхода увеличивается, причем тем быстрее, чем выше начальная водонасыщенность пласта. Таким образом, режим с протяженной областью гидратообразования реализуется в высокопроницаемых пластах, а также в случае высоких значений исходной водонасыщенности пласта. Это обусловлено тем, что с одной стороны увеличение проницаемости при неизменном массовом расходе требует уменьшения давления в пласте. С другой стороны увеличение исходной водонасыщенности приводит к росту тепловыделения на границе фазовых переходов и соответственно к повышению температуры пласта и равновесного давления гидратообразования. Таким образом, реализация режима с протяженной областью гидратообразования в случаях высоких значений проницаемости пласта и его исходной водонасыщенности обусловлена тем, что при данных условиях давление на границе фазовых переходов оказывается ниже равновесного давления образования газогидрата углекислого газа, соответствующего температуре на этой границе.

Выводы

Из анализа результатов численных расчетов следует, что в случае инъекции углекислого газа в пласт, насыщенный в исходном состоянии водой и метаном и имеющий проницаемость в диапазоне $k_0=10^{-14}-10^{-12} \text{ м}^2$, в зависимости от расхода закачки и исходной водонасыщенности пласта образование газогидрата диоксида углерода может происходить как на фронтальной поверхности, так и в протяженной области. Для величины расхода закачки углекислого газа существует предельное значение, равное примерно $1 \text{ кг/(м} \cdot \text{с)}$ при проницаемости $k_0=10^{-13} \text{ м}^2$ и водонасыщенности $S_{l0}=0,11$, ниже которого образование газогидрата происходит в протяженной области. Величина данного предельного значения расхода закачки углекислого газа увеличивается примерно прямо пропорционально проницаемости пласта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bradshaw J., Cook P. Geological sequestration of carbon dioxide // *Environmental Geosciences*. – 2001. – V. 8. – № 3. – P. 149–151.
2. Karacan C.O., Mitchell G.D. Behavior and effect of different coal microlithotypes during gas transport for carbon dioxide sequestration into coal seams // *Int. J. Coal Geology*. – 2003. – V. 53. – P. 201–217.
3. Oldenburg C.M., Pruess R., Benson S.M. Process modeling of CO₂ injection into natural gas reservoirs for carbon sequestration and enhanced gas recovery // *Energy Fuel*. – 2001. – V. 15. – P. 293–298.
4. Benson S.M., Cole D.R. CO₂ sequestration in deep sedimentary formations // *Elements*. – 2008. – V. 4. – P. 325–331.
5. Akinnikawe O., Ehlig-Economides C.A. Geologic model and fluid flow simulation of Woodbine aquifer CO₂ sequestration // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. – 2016. – V. 49. – P. 1–13.
6. Lombardi S., Altunina L.K., Beaubien S.E. *Advances in the geological storage of carbon dioxide*. – Berlin: Springer Publ., 2006. – 362 p.
7. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage / B. Metz, O. Davidson, H.C. Coninck, M. Loos, L.A. Meyer. – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – 442 p.
8. 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.
9. Оценка возможности захоронения углекислого газа в криолитозоне Западной Сибири / А.Д. Дучков, Л.С. Соколова, Д.Е. Аюнов, М.Е. Пермяков // *Криосфера Земли*. – 2009. – Т. 13. – № 4. – С. 62–68.
10. Sloan E.D., Koh C.A. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. – Boca Raton: CRC Press, 2007. – 752 p.
11. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. *Газовые гидраты*. – М.: Химия, 1980. – 296 с.
12. Хасанов М.К. Исследование режимов образования газогидратов в пористой среде, частично насыщенной льдом // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2015. – Т. 22. – № 2. – С. 255–266.
13. Theoretical research of the gas hydrate deposits development using the injection of carbon dioxide / V.Sh. Shagapov, M.K. Khasanov, N.G. Musakaev, Ngoc Hai Duong // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – V. 107. – P. 347–357.
14. Цыпкин Г.Г. Образование гидрата углекислого газа при его инъекции в истощенное месторождение углеводородов // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. – 2014. – № 6. – С. 101–108.
15. Цыпкин Г.Г. Образование гидрата при инъекции жидкой двуокиси углерода в пласт, насыщенный метаном и водой // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. – 2016. – № 5. – С. 99–107.
16. MRI measurements of CO₂ hydrate dissociation rate in a porous medium / M. Yang, Y. Song, Y. Zhao, Y. Liu, L. Jiang, Q. Li // *Magn. Reson. Imaging*. – 2011. – V. 29. – P. 1007–1013.
17. Хасанов М.К., Мусакаев Н.Г., Гималтдинов И.К. Особенности разложения газогидратов с образованием льда в пористой среде // *Инженерно-физический журнал*. – 2015. – Т. 88. – № 5. – С. 1022–1031.
18. Гималтдинов И.К., Хасанов М.К. Математическая модель образования газогидрата при инъекции газа в пласт, частично насыщенный льдом // *Прикладная математика и механика*. – 2016. – Т. 80. – № 1. – С. 80–90.
19. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. *Движение жидкостей и газов в природных пластах*. – М.: Недра, 1982. – 208 с.
20. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. *Подземная гидромеханика*. – М.: Недра, 1993. – 416 с.

Поступила 15.06.2017 г.

Информация об авторах

Хасанов М.К., кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной информатики и программирования Факультета математики и информационных технологий Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета.

UDC 532.546:536.421

NUMERICAL SIMULATION OF CARBON DIOXIDE INJECTION INTO A DEPLETED HYDROCARBON DEPOSIT

Marat K. Khasanov,
hasanovmk@mail.ru

Sterlitamak Branch of Bashkir State University,
37, Lenin Avenue, Sterlitamak, 453103, Russia.

Now underground utilization of the carbon dioxide worked out by industrial facilities is one of directions of solving the problem of prevention of further increase in greenhouse gas concentration in the Earth's atmosphere. At the same time the safest and the most reliable method of prevention of greenhouse gas exit to the surface is their conversion into the gas hydrate state, which allows storing the huge amount of gas in the small volume and at low pressures.

The aim of the work is the theoretical research of hydrodynamic and thermophysical processes at underground utilization of greenhouse gases in the gas hydrate state.

Based on the methods of mechanics of continuous medium the author has built the mathematical model of carbon dioxide injection in a natural layer, saturated with the water and methane in the initial state, followed by hydrate formation. For the case of injection of the warm carbon dioxide (with the temperature exceeding the initial temperature of the layer) the author constructed the self-similar solutions of the plane-rational task describing dynamics of temperature and hydrodynamic fields in the layer.

As a result of numerical calculations it was determined that formation of carbon dioxide gas hydrate can happen both on the frontal surface, and in the extended zone. The author defined the limiting values of the mass flow rate of carbon dioxide injection, corresponding to occurrence of an extended gas hydrate formation zone. It is shown that the mode with formation of gas hydrate in extended area is implemented at small values of mass flow rate of injection, as well as at high values of permeability and initial water saturation of layer. Implementation of the mode with extended area of hydrate formation in layers with high values of permeability and initial water saturation, and also at small values of the mass flow rate of injection is caused by the fact that under existing conditions the pressure on phase transitions border is below the equilibrium pressure of formation of carbon dioxide gas hydrate corresponding to the temperature on this border.

Key words:

Porous medium, gas hydrates, carbon dioxide, filtration, hydrate formation.

REFERENCES

1. Bradshaw J., Cook P. Geological sequestration of carbon dioxide. *Environmental Geosciences*, 2001, vol. 8, no. 3, pp. 149–151.
2. Karacan C.O., Mitchell G.D. Behavior and effect of different coal microlithotypes during gas transport for carbon dioxide sequestration into coal seams. *Int. J. Coal Geology*, 2003, vol. 53, pp. 201–217.
3. Oldenburg C.M., Pruess R., Benson S.M. Process modeling of CO₂ injection into natural gas reservoirs for carbon sequestration and enhanced gas recovery. *Energy Fuel*, 2001, vol. 15, pp. 293–298.
4. Benson S.M., Cole D.R. CO₂ sequestration in deep sedimentary formations. *Elements*, 2008, vol. 4, pp. 325–331.
5. Akinnikawe O., Ehlig-Economides C.A. Geologic model and fluid flow simulation of Woodbine aquifer CO₂ sequestration. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, vol. 49, pp. 1–13.
6. Lombardi S., Altunina L.K., Beaubien S.E. *Advances in the geological storage of carbon dioxide*. Berlin, Springer Publ., 2006. 362 p.
7. Metz B., Davidson O., Coninck H.C., Loos M., Meyer L.A. *IPCC special report on carbon dioxide capture and storage*. Cambridge, Cambridge University Press, 2005. 442 p.
8. Chuvilin E.M., Guryeva O.M. Experimental investigation of CO₂ gas hydrate formation in porous media of frozen and freezing sediments. *Earth's Cryosphere*, 2009, vol. 13, no. 3, pp. 70–79. In Rus.
9. Duchkov A.D., Sokolova L.S., Ayunov D.E., Permyakov M.E. Assessment of potential of west Siberian permafrost for the carbon dioxide storage. *Earth's Cryosphere*, 2009, vol. 13, no. 4, pp. 62–68. In Rus.
10. Sloan E.D., Koh C.A. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. Boca Raton, CRC Press, 2007. 752 p.
11. Byk S.Sh., Makogon Yu.F., Fomina V.I. *Gazovye gidraty* [Gas hydrates]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 296 p.
12. Khasanov M.K. Investigation of regimes of gas hydrate formation in a porous medium, partially saturated with ice. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 255–265. In Rus.
13. Shagapov V.Sh., Khasanov M.K., Musakaev N.G., Ngoc Hai Duong Theoretical research of the gas hydrate deposits development using the injection of carbon dioxide. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 107, pp. 347–357.
14. Tsyppin G.G. Formation of carbon dioxide hydrate at the injection of carbon dioxide into a depleted hydrocarbon field. *Fluid Dynamics*, 2014, vol. 49, no. 6, pp. 789–795. In Rus.
15. Tsyppin G.G. Formation of hydrate in injection of liquid carbon dioxide into a reservoir saturated with methane and water. *Fluid Dynamics*, 2016, vol. 51, no. 5, pp. 672–679. In Rus.
16. Yang M., Song Y., Zhao Y., Liu Y., Jiang L., Li Q. MRI measurements of CO₂ hydrate dissociation rate in a porous medium. *Magn. Reson. Imaging*, 2011, vol. 29, pp. 1007–1013.
17. Khasanov M.K., Musakaev N.G., Gimaltdinov I.K. Features of the Decomposition of Gas Hydrates with the Formation of Ice in a Porous Medium. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2015, vol. 88, no. 5, pp. 1052–1061. In Rus.
18. Gimaltdinov I.K., Khasanov M.K. Mathematical model of the formation of a gas hydrate on the injection of gas into a stratum partially saturated with ice. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, vol. 80, no. 1, pp. 57–64. In Rus.
19. Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M. *Dvizhenie zhidkostey i gazov v prirodnykh plastakh* [Movement of liquids and gases in natural formations]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 208 p.
20. Basmiev K.S., Kochina I.N., Maksimov V.M. *Podzemnaya gidromekhanika* [Underground hydromechanics]. Moscow, Nedra Publ., 1993. 416 p.

Received: 15 June 2017.

Information about the author

Marat K. Khasanov, Cand. Sc., associate professor, Sterlitamak Branch of Bashkir State University.