

УДК 532.546

К ТЕОРИИ ВЫМЫВАНИЯ ГАЗА ИЗ ГАЗОГИДРАТНОГО МАССИВА

А. С. Чиглинцева, В. Ш. Шагапов

Бирская социально-педагогическая академия, Бирск

Аннотация. В работе анализирована принципиальная возможность извлечения газа из состава газогидратного массива посредством вымывания теплой водой.

Ключевые слова: газогидрат, теплоноситель, газ, газогидратный пласт, модель

1. Введение

Согласно современным геологическим данным запасы углеводородного газа находятся на дне мирового океана в виде твердых газогидратных отложений. Извлечение газа из состава газогидратных массивов возможно их растоплением. В работе рассматривается задача о вымывании газа из состава газогидрата посредством инъекции теплой воды в необсаженную скважину, находящуюся в газогидратном массиве.

2. Основные уравнения

Температура воды около морского дна составляет около четырех градусов по Цельсию и поэтому в расчетах будем полагать, что газогидратный массив имеет постоянную температуру $T_{h0} = 4^\circ\text{C}$ ($T_{h0} = 277\text{ K}$). Пусть $p_{h0} = p_s(T_{h0})$ равновесное давление, соответствующее исходной температуре T_{h0} (при $T = T_{h0}$ и $p = p_{h0}$ газогидрат может находиться в равновесном состоянии с продуктами разложения, то есть водой и газом).

В чистом газогидратном массиве находится скважина. Стенка скважины представляет собой осесимметричную поверхность с радиусом, зависящим от координаты z и времени t ($a = a(z, t)$). Причем ось скважины может быть наклонена от вертикального направления на угол β . Осевую

координату будем отсчитывать от входа скважины. Газожидкостной поток в скважине описывается в квазиодномерном и квазистационарном приближении.

Уравнения масс для жидкой и газовой фаз:

$$\frac{dm_i}{dz} = 2\pi a j_i, \quad m_i = Sw\rho_i^0\alpha_i \quad (i = g, l) \quad (1)$$

$$(\alpha_g + \alpha_l = 1, \quad S = \pi a^2).$$

Здесь m_i , ρ_i^0 , α_i , w — соответственно массовый расход, истинная плотность, объемное содержание i -ой фазы ($i = g$ и $i = l$ относится к газовой и жидкой фазам); w — среднерасходная скорость; j_i — массовая интенсивность поступления i -ой фазы за счет смыва газогидрата теплой водой со стенки скважины, отнесенная на единицу ее площади. Газ и вода в составе газогидрата находятся в стехиометрическом соотношении, а именно

$$j_g = Gj, \quad j_l = (1 - G)j, \quad (2)$$

где G — массовая концентрация газа в составе газогидрата; j — массовая интенсивность смыва газогидрата, отнесенная к единице площади поверхности скважины.

Уравнение импульсов может быть записано в виде:

$$m\frac{dw}{dz} = -S\frac{dp}{dz} - S\rho g \cos\beta - 2\pi a\tau - 2\pi a j w \quad (3)$$

$$(m = m_g + m_l, \quad \rho = \rho_g^0\alpha_g + \rho_l^0\alpha_l),$$

где τ — сила трения между потоком и стенкой скважины, отнесенная к единице площади поверхности.

Запишем уравнение притока тепла для двухфазного потока:

$$(m_g c_g + m_l c_l) \frac{dT}{dz} = \frac{m_g}{\rho_g^0} \frac{dp}{dz} + 2\pi a j c (T_a - T) - 2\pi a q^- \quad (4)$$

$$(c = c_g G + c_l (1 - G)).$$

Здесь T и T_a — температуры двухфазного потока в скважине и стенке скважины; c_i ($i = g, l$) — теплоемкости газа и воды (при постоянном давлении); q^- — интенсивность теплообмена между двухфазным потоком в скважине и стенкой, отнесенная к единице ее площади.

Жидкость будем считать несжимаемой, а газ калорически совершенным:

$$\rho_l^0 = \text{const}, \quad p = \rho_g^0 R_g T.$$

Силу трения между потоком и скважиной примем в виде:

$$\tau = \xi \frac{\rho w^2}{8}, \quad \xi = \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}}, \quad \text{Re} = \frac{2a\rho w}{\mu}. \quad (5)$$

Здесь выражение для коэффициента гидравлического сопротивления ξ соответствует формуле Блазиуса для гладких труб; Re — критерий Рейнольдса для двухфазного потока; μ — эффективный коэффициент динамической вязкости для двухфазной смеси.

Для интенсивности теплового потока используем формулу

$$\begin{aligned} q^- &= \beta^-(T - T_a), \quad \beta^- = \frac{\lambda Nu^-}{2a}, \\ Nu^- &= 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.43}, \quad Pr = \frac{\mu c}{\lambda}, \end{aligned} \quad (6)$$

где Pr и Nu^- — приведенные числа Прандтля и Нуссельта; λ — эффективный коэффициент теплопроводности для двухфазной смеси.

Коэффициенты динамической вязкости μ и теплопроводности λ для смеси определяются по формулам:

$$\mu = \mu_g \alpha_g + \mu_l \alpha_l, \quad \lambda = \lambda_g \alpha_g + \lambda_l \alpha_l. \quad (7)$$

3. Описание интенсивности вымывания газогидрата

Интенсивность j разрушения газогидрата лимитируется интенсивностью подвода тепла к поверхности скважины. При этом температура стенки скважины T_a равна равновесной температуре разложения газогидрата T_s , которая соответствует значению давления p для данного сечения ($T_a = T_s(p)$). Для зависимости $T_s(p)$ будем использовать выражение

$$T_{(s)}(p) = T_{(h0)} + T_* \ln(p/p_{(h0)}). \quad (8)$$

В соответствии с вышесказанным можно записать:

$$j = \frac{q^- - q^+}{l_h}, \quad q^+ = -\lambda_h \left(\frac{\partial T_h}{\partial r} \right)_a. \quad (9)$$

Здесь q^+ — интенсивность теплового потока от стенки скважины в газогидратный массив; λ_h и l_h — коэффициент теплопроводности и удельная теплота разложения газогидрата. Уравнение теплопроводности вблизи стенок скважины запишем в виде:

$$\rho_h^0 c_h \frac{\partial T_h}{\partial t} = \lambda_h r^{-1} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_h}{\partial r} \right) \quad (a < r < \infty). \quad (10)$$

При этом температура должна удовлетворять граничным условиям:

$$T_h = T_a \quad (r = a), \quad T = T_{h0} \quad (r = \infty). \quad (11)$$

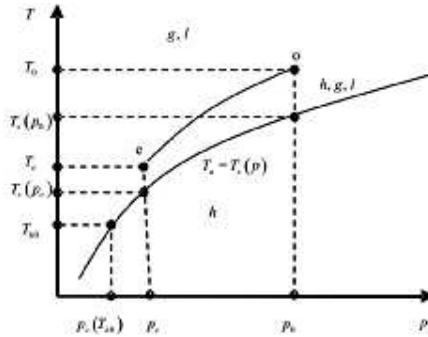


Рис. 1. Фазовая диаграмма

Для начального момента времени (до начала эксплуатации скважины) поле температур должно удовлетворять условию:

$$T_h = T_{h0} \quad (t = 0, \quad r \geq a_0). \quad (12)$$

Скорость изменения радиуса скважины ($a = a(z, t)$) будем определять на основе уравнения

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \frac{j}{\rho_h^0}. \quad (13)$$

4. Результаты расчетов

Выше приведенные теоретические представления позволяют провести численные эксперименты по эксплуатации скважины в газогидратном массиве.

На Рис. 1 на плоскости p, T схематично представлена фазовая диаграмма, соответствующая обстановке в скважине. Чтобы происходило разложение газогидрата на поверхности стенки скважины, фазовая траектория oe на этой плоскости, соответствующая распределению давления и температуры воды в скважине, должна находиться выше кривой фазового равновесия — h, g, l . На Рис. 2 представлено распределение гидродинамических и температурных полей в скважине. На Рис. 3 — интенсивность вымывания газогидрата и радиуса скважины во времени. В расчетах полагалось, что скважина в начальный момент времени ($t = 0$) представляет собой цилиндрический канал радиусом $a_0 = 0.1$ м и радиусом теплового влияния скважины $a_{*0} = 0.11$ м с длиной $z_e = 300$ м.

Параметры, определяющие режим эксплуатации скважины, имели следующие значения: $m_{l0} = 314.159$ кг/с, $m_{g0} = 0$, $p_0 = 10$ МПа, $T_0 = 300$ К, ($T_s(p_0) = 290$ К). Числа на кривых выражают время в часах. Со

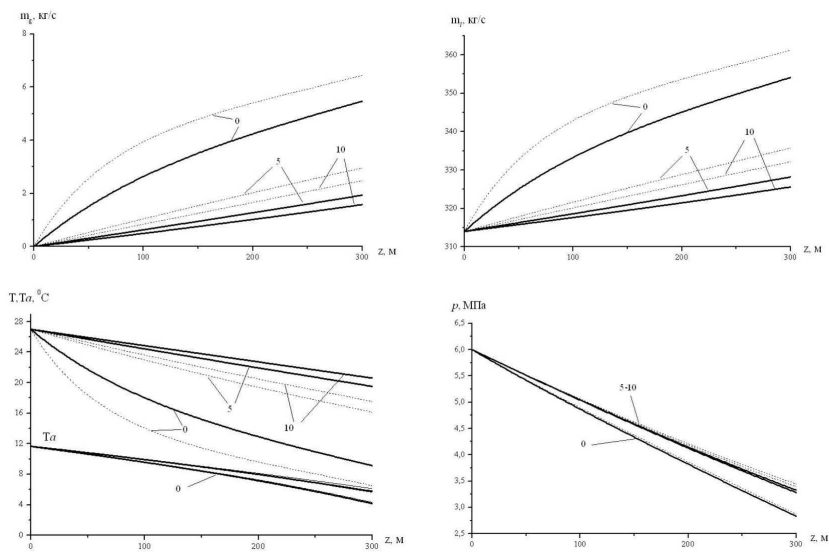


Рис. 2. Распределение вдоль скважины гидродинамических и температурных полей

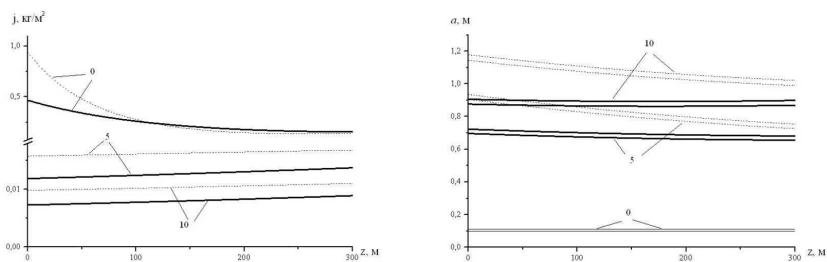


Рис. 3. Интенсивность вымывания газогидрата и радиуса скважины со временем

временем снижается расход газа на выходе скважины. Это происходит, не смотря на то, что при заданном постоянном расходе теплоносителя m_0 с температурой T_0 за счет смывания газогидрата происходит рост радиуса скважины и тем самым увеличение поверхности контакта между теплоносителем и газогидратным массивом. Кроме этого, увеличение радиуса приводит к снижению линейной скорости потока. А это, в свою очередь, обуславливает увеличение времени пребывания теплоносителя в скважине. Такое поведение расхода газа связано с сильной зависимостью теплового потока, определяемого значением числа Нуссельта Nu^- , от величины линейной скорости потока. Поэтому, хотя снижение коэффициента теплопередачи из-за снижения скорости происходит более быстро. Штриховыми линиями на Рис. 2, 3 представлены результаты расчетов, соответствующие удвоенным текущим значениям числа Нуссельта Nu^- . Эти кривые иллюстрируют влияние роста теплопередачи, которую в реальности можно добиваться увеличением линейных скоростей возле стенок скважины на интенсивность вымывания газогидратного массива.

5. Заключение

Показана принципиальная возможность извлечения газа из газогидратного пласта посредством закачки теплой воды в скважину, находящуюся в газогидратном массиве. Наиболее выгодными являются режимы закачки теплоносителя при более низких давлениях с реализацией более высоких значений линейных скоростей потока.

Список литературы

- [1] Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Т. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
- [2] Нигматулин Р. И., Шагапов В. Ш., Сыртланов В. Р. Автомодельная задача о разложении газогидратов в пористой среде при депрессии и нагреве // Прикладная механика и техническая физика. 1998. Т. 39, № 3. С. 111–118.
- [3] Шагапов В. Ш., Мусакаев Н. Г. Теоретическое моделирование работы газонефтяной скважины в осложненных условиях // Прикладная механика и техническая физика. 1997. Т. 38, № 2. С. 125–134.