УДК 532.546

РАЗЛОЖЕНИЕ ГАЗОГИДРАТА, ЧАСТИЧНО ЗАПОЛНЯЮЩЕГО ПОРИСТЫЙ ПЛАСТ, ПОСРЕДСТВОМ ЗАКАЧКИ ГОРЯЧЕГО ГАЗА

Исангильдина М.А.,

научный руководитель канд. физ.-мат. наук Дмитриев В.Л.

Стерлитамакская государственная педагогическая академия им. Зайнаб Биишевой

Проблеме разработки газогидратных месторождений посвящено множество работ, в которых предлагаются самые разнообразные способы добычи газа из столь уникального источника. Некоторые из них описаны в работах [1 – 9]. Одним из способов получения газа из гидрата является закачка аналогичного теплого газа в гидратосодержащий пласт. С другой стороны, описываемый способ может быть полезен при удалении газогидратных пробок и отложений, возникающих в скважинах и коллекторах, что делает его универсальным. Кроме того, с точки зрения энергетического баланса, добыча газа из газогидрата путем закачки в пласт аналогичного горячего газа является очень эффективным способом.

В данной работе предложена математическая модель, описывающая процессы разложения газового гидрата на основе закачки одноименного теплого газа в условиях радиальной симметрии.

Пусть имеется однородный, горизонтальный пласт постоянной толщины и неограниченной протяженности, представляющий собой пористую среду, заполненную газогидратом и газом. Кровля и подошва пласта непроницаемы. В пласте пробурена скважина, вскрывшая пласт на всю толщину. Через границу области пористой среды, заполненной в исходном состоянии частично газом, а частично газогидратом, происходит закачка горячего газа с постоянным массовым расходом Q_m.

Будем полагать, что при закачке газа в пористой среде образуются две характерные зоны [7]. В первой зоне в поровых каналах содержатся лишь продукты разложения газогидрата (газ и вода), а твердый газогидрат отсутствует. Во второй зоне в поровых каналах присутствуют газогидрат и газ. Объемная доля газогидрата в поровых каналах для этой зоны составляет n. Таким образом, разложение газогидрата полностью происходит на фронтальной границе между этими зонами. Параметры, соответствующие первой и второй зонам, будем снабжать нижними индексами $i = 1, 2$.

При математическом описании процессов фильтрации и теплопереноса примем следующие допущения: скелет, газогидрат, вода несжимаемы; газ – калорически совершенный, газовая фаза является подвижной, вода – неподвижной ($u_l = 0$). В данной модели температура газа, жидкости, гидрата и пористой среды в каждой точке совпадают. Гидрат является двухкомпонентной системой с массовой концентрацией газа g (массовая концентрация жидкости 1- g). Кроме того, будем пренебрегать переменностью объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности системы «пористая среда – газогидрат – продукты разложения»:

$$rc = const,\ r_{g(i)}c_{g(i)} = r_g c_g = const,\ l_i = l = const,$$

где c и c_g – теплоемкость всей системы и газа при постоянном давлении.

Доля пор, заполненная твердым газогидратом, определяется гидратонасыщенностью n, остальная часть 1- n порового объема занята газом. При этом $S_g + S_l = 1$, S_g и S_l – газонасыщенность и водонасыщенность соответственно.

Учтем тот факт, что фактическая («живая») пористость пласта не равна пористости скелета породы m, а зависит от текущей гидратонасыщенности. Поэтому абсолютная проницаемость газогидратного пласта зависит от степени наполнения пор скелета гидратом. Примем зависимость абсолютной проницаемости от «живой» пористости на основе формулы Козейни:

$$k_g = k_0 \frac{m_\nu^3}{(1-m_\nu)^2} \approx k_{g0} S_g^3 (1-\nu)^3, \quad \left(m_\nu = m S_g, k_{g0} = k_0 m^3\right),$$

где k_0 – абсолютная проницаемость скелета породы.

Система уравнений, описывающих процессы фильтрации в пористой среде при разложении гидрата на газ и воду, запишется в следующем виде:

$$m_i \frac{\partial \rho_{g(i)}}{\partial t} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r \rho_{g(i)} m_i u_{g(i)}\right) = 0, \quad m_i u_{g(i)} = -\frac{k_i}{\mu_{g(i)}}\frac{\partial p_i}{\partial r},$$

$$T_s(p_s) = T_0 + T_* \ln\left(\frac{p_s}{p_{s(0)}}\right), \quad p_i = \rho_{g(i)} R_g T_i,$$

$$\rho c \frac{\partial T_i}{\partial t} + \rho_g c_g m_i u_{g(i)} \frac{\partial T_i}{\partial r} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda r \frac{\partial T_i}{\partial r}\right),$$

где T_0 – исходная температура системы «пористая среда – газогидрат – газ», $p_{s(0)}$ – равновесное давление, соответствующее исходной температуре, T_* – эмпирический параметр, зависящий от вида газогидрата.

Уравнения баланса массы воды и газа, а также баланса тепла на границе между зонами:

$$m\nu\rho_h^0(1-\gamma)\dot r_s = m S_{l(1)} \rho_l^0 \dot r_s,$$

$$m\left[(1-\nu)\rho_{g(s)}^0\left(u_{g(2)} - \dot r_s\right) - \nu\rho_h^0 \gamma \dot r_s\right] = m S_{g(1)} \rho_{g(s)}^0\left(u_{g(1)} - \dot r_s\right),$$

$$\lambda \frac{\partial T_2}{\partial r} - \lambda \frac{\partial T_1}{\partial r} = m\nu\rho_h^0 l \dot r_s.$$

На основе уравнения неразрывности, используя закон Дарси с учетом, что газ является калорически совершенным и, учитывая, что слагаемое за счет переменности температуры несущественно, если характерные перепады температуры ΔT в области фильтрации небольшие $(\Delta T << T_0)$, получим уравнение пьезопроводности:

$$\frac{\partial p_i}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r \frac{p_i k_i}{m_i \mu_{g(i)}}\frac{\partial p_i}{\partial r}\right).$$

Уравнение притока тепла, используя закон Дарси, можно преобразовать к следующему виду:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \mathrm{A}^{(T)} \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r \frac{\partial T_i}{\partial r}\right) + \frac{b\, k_i}{\mu_{g(i)}}\frac{\partial p_i}{\partial r}\frac{\partial T_i}{\partial r}.$$

В дальнейшем примем следующие обозначения:

$$\mathrm{A}_i^{(p)} = \frac{k_i p_0}{\mu_{g(i)} m_i}, \ \mathrm{A}^{(T)} = \frac{\lambda}{\rho c}, \ \eta_i = \frac{\mathrm{A}_i^{(p)}}{\mathrm{A}^{(T)}}, \ b = \frac{\rho_g c_g}{\rho c}, \ k_1 = k_0 m^3 S_g^3, \ k_2 = k_0 m^3 S_g^3 (1-\nu)^3.$$

Будем полагать, что в начальный момент времени в пористой среде, частично заполненной газогидратом, давление p_0 и температура T_0 однородны (причем $p_0 > p_{s(0)}$), а на границе разложения потребуем непрерывность давления и температуры газа:

$$p_2 = p_0, \quad T_2 = T_0 \qquad (t = 0,\ r \geq 0),$$
$$p_1 = p_2 = p_s, \ T_1 = T_2 = T_s \qquad (r = r_s).$$

Будем полагать, что в момент времени $t = 0$ начинается нагнетание газа с постоянным массовым расходом Q_m, причем

$$T_1 = T_e,\ t > 0,\ (r = r_e \to 0)$$
$$2\pi r_e \left(\rho_{g(1)} m_1 u_{g(1)}\right)_{r_e} = Q_{(m)}, \quad (t > 0,\ r_e \to 0)$$

Последнее уравнение с учётом закона Дарси запишется в виде

$$-2\pi r_e \frac{k_1}{\mu_{g(1)} R_g T_e} \left(p_1 \frac{\partial p_1}{\partial r}\right)_{r_e} = Q_m, \quad \left(t > 0,\ r_e \to 0\right)$$

Сформулированная выше задача является автомодельной [1]. Перейдем к автомодельной переменной: $\xi = \dfrac{r}{2\sqrt{\mathrm{A}^{(T)} t}}$. Тогда уравнение пьезопроводности и уравнение притока тепла в автомодельных переменных запишутся в виде

$$\frac{\eta_i}{\xi} \frac{d}{d\xi}\left(\xi \frac{dp_i^2}{d\xi}\right) = -2\xi \frac{dp_i^2}{d\xi},$$

$$\frac{1}{\xi} \frac{d}{d\xi}\left(\xi \frac{dT_i}{d\xi}\right) + \left(2\xi + \frac{\beta k_i}{\mu_{g(i)} \mathrm{A}^{(T)}} \frac{dp_i}{d\xi}\right) \frac{dT_i}{d\xi} = 0.$$

Тогда для распределения давлений и температур в первой и второй зонах, с учетом начальных и граничных условий, получим следующие выражения:

$$p_1^2 = p_s^2 + \frac{Q_m \mu_{g(1)} R_g T_e}{\pi k_1} \int_{\xi}^{\xi_s} \frac{1}{\xi'} \exp\left(-\frac{\xi'^2}{\eta_1}\right) d\xi', \quad \left(0 < \xi < \xi_s\right)$$

$$p_2^2 = p_s^2 + \left(p_0^2 - p_s^2\right) \frac{\int_{\xi_s}^{\xi} \frac{1}{\xi'} \exp\left(-\frac{\xi'^2}{\eta_2}\right) d\xi'}{\int_{\xi_s}^{\infty} \frac{1}{\xi'} \exp\left(-\frac{\xi'^2}{\eta_2}\right) d\xi'} \quad \left(\xi_s < \xi < \infty\right).$$

$$T_1 = T_e + \left(T_s - T_e\right) \frac{\int_{0}^{\xi} \frac{1}{\xi'} \exp\left(-\xi'^2 - \frac{\beta k_1 p_1}{\mu_{g(1)} \mathrm{A}^{(T)}}\right) d\xi'}{\int_{0}^{\xi_s} \frac{1}{\xi'} \exp\left(-\xi'^2 - \frac{\beta k_1 p_1}{\mu_{g(1)} \mathrm{A}^{(T)}}\right) d\xi'}, \qquad \left(0 < \xi < \xi_s\right)$$

$$T_2 = T_s + \left(T_0 - T_s\right) \frac{\int_{\xi_s}^{\xi} \frac{1}{\xi'} \exp\left(-\xi'^2 - \frac{\beta k_2 p_2}{\mu_{g(2)} \mathrm{A}^{(T)}}\right) d\xi'}{\int_{\xi_s}^{\infty} \frac{1}{\xi'} \exp\left(-\xi'^2 - \frac{\beta k_2 p_2}{\mu_{g(2)} \mathrm{A}^{(T)}}\right) d\xi'} \qquad \left(\xi_s < \xi < \infty\right).$$

На основе уравнений баланса массы газа и тепла на границе (в автомодельных переменных) и распределений давлений и температур в первой и второй зонах, получаем уравнения для определения координаты границы разложения ξ_s.

На основе проведенных расчетов можно сделать следующие выводы. С ростом гидратонасыщенности уменьшается ширина фильтрационной зоны, что связано с увеличением количества гидрата. При этом спад давления во второй зоне более резкий. Изменение гидратонасыщенности практически не влияет на скорость выравнивания температуры с исходной пластовой.

При увеличении массового расхода закачиваемого газа (даже в несколько раз) координаты границы разложения газогидрата меняется незначительно. Это объясняется тем, что при высоких давлениях температура разложения газогидрата значительно возрастает. С увеличением массовых расходов растет доля конвективной составляющей, что ведет к заметному уменьшению относительного интервала зоны падения температуры. Под относительным интервалом здесь понимается отношение протяженности зоны, в которой реализуется перепад температур, к протяженности прогретой зоны.

Большие массовые расходы приводят к тому, что горячий газ проникает вглубь гидратонасыщенного пласта, не успев охладиться до температуры, обеспечивающей стабильность газогидрата – как следствие, газогидрат при этом окажется перегретым. В результате, для корректного описания процесса необходимо вводить объемную зону фазовых переходов.

Список литературы

1. Нигматулин Р.И., Сыртланов В.Р., Шагапов В.Ш. Автомодельная задача о разложении газогидратов в пористой среде при депрессии и нагреве.// ПМТФ. – 1998. Т.39. № 3. – С. 111 – 118.
2. Истомин В.А., Якушев В.С. Исследование газовых гидратов в России.// Газовая промышленность. – 2001, № 6. – С. 49 – 54.
3. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра. – 1992. – 235 с.
4. Клеркс Я., Земская Т. И., Матвеева Т. В., и др. Гидраты метана в поверхностном слое глубоководных осадков озера Байкал // ДАН. – 2003. Т. 393, № 6. – С. 822 – 826.
5. Кузнецов Ф.А., Дядин Ю.А., Родионова Т.В. Газовые гидраты – неисчерпаемый источник углеводородного сырья.// Российский химический журнал. – 1997, № 6. – С. 28 – 34.
6. Мусакаев Н.Г., Хасанов М. К. Математическая модель диссоциации газогидрата в пористой среде при инжекции и отборе газа. // Дифференциальные уравнения и смежные проблемы: Труды Международной конференции. – Уфа: Гилем, 2008. – С. 133-138.
7. Шагапов В.Ш., Насырова Л.А., Потапов А.А., Дмитриев В.Л. Тепловой удар под воздействием энергии излучения на пористую среду, частично заполненную газогидратом.// Инженерно-физический журнал. – 2003. Т.76. № 5. – С. 47 – 53.
8. Шагапов В.Ш., Сыртланов В. Р. Диссоциация гидратов в пористой среде при депрессионном воздействии.// ПМТФ. – 1995. Т.36. № 4. – С. 120 – 130.
9. Шагапов В.Ш., Сыртланов В.Р., Галиакбарова Э.В. Депрессионное разложение газогидратов со степенной зависимостью абсолютной проницаемости от гидратонасыщенности. // Итоги исследования ИММС СО РАН. № 6. Тюмень. – 1995. – С. 102 – 111.