



ISSN: 2658–5782

Номер 1

Январь–Март 2019

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





Математическое моделирование процесса разложения газогидратного пласта без воздействия различных внешних источников

Юзиев В.Э., Русинов А.А.

Бирский филиал Башкирского государственного университета, Бирск

В работе рассматривается однородный пласт в форме блина с характерными линейными размерами, соответствующими реальным залежам: с радиусом порядка нескольких километров, а высотой — десятки метров. Поскольку радиусы таких пластов намного больше их толщины, то это позволяет учесть тепловые взаимодействия месторождения с окружающими породами через верхнюю и нижнюю границы пласта в плоскооднородном приближении. Для описания модели были использованы основные уравнения: закон сохранения масс газа и воды в пласте, уравнения баланса тепла и температурных полей вблизи границы пласта, а также начальные и граничные условия. Построенная теоретическая модель позволяет анализировать возможность реализации полной газоотдачи пластов только за счет тепловых резервов самих гидратных пластов, а также окружающих пласт горных массивов. Для значений параметров, определяющих начальное состояние пласта, проведены численные эксперименты, представлена динамика пластового давления и гидратонасыщенности в пласте. В результате исследования установлено, что при постоянном темпе отбора газа достижение пластового давления 2.6 МПа и соответственно температуры 273 К произошло примерно за 5 лет. Показано, что при отборе газа из пласта с радиусом 3000 м и толщиной 50 м его гидратонасыщенность в течение 5 лет уменьшается примерно на 38%.

Ключевые слова: газогидрат, пористая среда, фазовый переход

Введение

С каждым годом растет интерес к проблеме газовых гидратов. Это, прежде всего, связано с тем фактом, что природные газовые гидраты в перспективе могут стать новым источником природного газа [1]. Поскольку гидраты имеют довольно значительные ресурсы, залегающие на небольших глубинах и концентрированное состояние в них газа, то процесс добычи газа представляет собой большой интерес. Добыча газа из таких месторождений всегда связана с подачей тепла, необходимого для разложения гидратов [2, 3]. Определено, что при довольно низкой скорости эксплуатации газогидратных пластов подвод тепла может быть возобновлен за счет геотермального тепла самого

пласта и частично за счет отвода тепла из пород, окружающих газогидратный пласт [4].

1. Постановка задачи и основные уравнения

Рассмотрим однородный пласт в форме блина с характерными линейными размерами, соответствующими реальным залежам: с радиусом порядка нескольких километров, а высотой — десятки метров (рис. 1) [5].

Поскольку радиусы таких пластов намного больше их толщины ($R \gg H$), то это позволяет учесть тепловые взаимодействия месторождения с окружающими породами через верхнюю и нижнюю границы пласта в плоскооднородном приближении. Будем полагать, что гидратонасыщенность по всей толщине пласта однородна. Вертикальным градиентом температуры пласта и окружающих пород в начале эксплуатации будем пренебрегать.

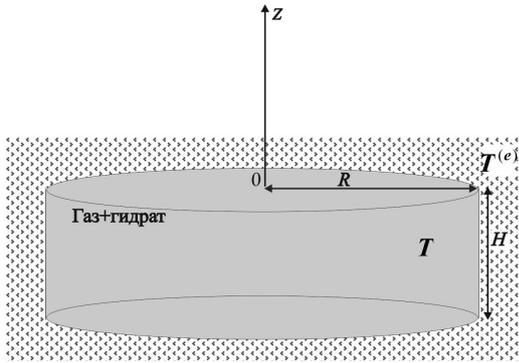


Рис. 1. Схема пласта

Начальная температура T_0 пласта и окружающих горных пород вблизи месторождения однородна.

Предположим, что в начале разработки месторождения искомое давление p_0 равно равновесному давлению для исходной температуры пласта ($p_0 = p_s(T_0)$). Кроме того, в процессе извлечения газа, давление и температура T в пласте полагают однородными, причем $p = p_s(T)$. В соответствии с этим понижение давления в пласте приводит к снижению температуры пласта и, следовательно, к изменению геологических температурных полей на месторождении и окружающих его породах.

Состояние пласта также описывается текущими значениями гидратонасыщенности S_h , газонасыщенности S_g , а также насыщенностью воды S_l , которая образуется при разложении газогидрата:

$$S_g + S_l + S_h = 1. \quad (1)$$

Текущий общий запас газа M_g в пласте можно запишем как:

$$M_g = \pi R^2 H m (\rho_g S_g + G \rho_h S_h),$$

где ρ_i ($i = g, h, l$) — плотности фаз; G — массовое содержание газа в составе газогидрата; m — пористость.

Для массы M_l воды в пласте запишется:

$$M_l = \pi R^2 H m (\rho_l S_l + (1 - G) \rho_h S_h). \quad (2)$$

Соотношения для сохранения масс газа и воды в пласте имеют вид:

$$\frac{dM_g}{dt} = -Q_g^{(m)}, \quad \frac{dM_l}{dt} = 0. \quad (3)$$

Здесь $Q_g^{(m)}$ означает общий массовый расход отбора газа из пласта. Из последнего уравнения (3) видно, что отбором воды из пласта можно пренебречь. Поэтому общая масса воды будет постоянной:

$$M_l = M_{l0}. \quad (4)$$

Полагая, что в начальном состоянии вода находится лишь в составе гидрата ($M_{l0} = \pi R^2 H m (1 - G) \rho_h S_{h0}$), на основе (4) с учетом (2) запишем:

$$\rho_l S_l + (1 - G) \rho_h S_h = (1 - G) \rho_h S_{h0}.$$

Отсюда можно получить текущее значение водонасыщенности S_l следующим образом:

$$S_l = (1 - G) \rho_h (S_{h0} - S_h) / \rho_l. \quad (5)$$

Подставим выражение (5) для S_l в (1) и для величины газонасыщенности получим:

$$S_g = 1 - S_h - (1 - G) \rho_h (S_{h0} - S_h) / \rho_l.$$

Будем полагать, что температура месторождения однородна и равна величине равновесной температуры фазовых переходов для газогидрата. В рамках принятой модели запишем уравнения баланса тепла:

$$\pi R^2 H \rho c \frac{dT}{dt} = \pi R^2 H m \rho_h l \frac{dS_h}{dt} + 2\pi R^2 q^{(T)}, \quad (6)$$

$$q^{(T)} = \lambda \left(\frac{\partial T'}{\partial z} \right) \Big|_{z=0},$$

$$(\rho c = \rho_{sc} c_{sc} (1 - m) + (\rho_h c_h S_h + \rho_l c_l S_l + \rho_g c_g S_g) m),$$

где ρc — удельная объемная теплоемкость системы.

Первое слагаемое в правой части (6) отражает тепловые затраты на разложение газового гидрата, а второе — интенсивность теплового потока в пласт из окружающего горного массива. Более того, предполагается, что поле температуры сверху и снизу месторождения симметрично. Чтобы определить поток тепла $q^{(T)}$ к пласту от окружающего горного массива, надо записать уравнение для описания температурных полей вблизи границы пласта в плоскооднородном приближении

$$\rho c \frac{\partial T'}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T'}{\partial z^2} \quad (0 < z). \quad (7)$$

Будем полагать, что к началу эксплуатации месторождения температура в пласте и окружающем массиве будет однородной и равной T_0 , перепады температуры реализуются в достаточно тонких слоях по сравнению с линейными размерами пласта. Следовательно, учитывая это, запишем начальные и граничные условия для уравнения (7):

$$T' = T_0, \quad (z \geq 0, \quad t \leq 0);$$

$$T' = T_s(p), \quad (z = 0, \quad t > 0);$$

$$T' = T_0, \quad (z = \infty, \quad t > 0).$$

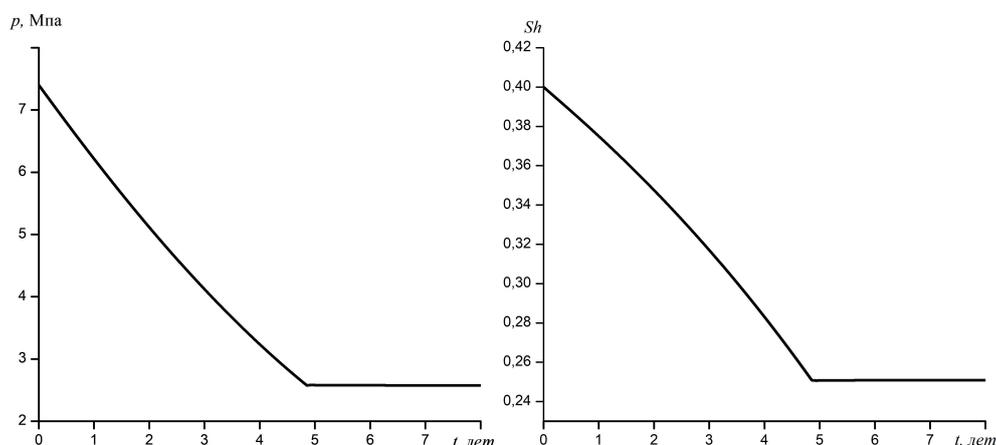


Рис. 2. Эволюция давления и гидратонасыщенности пласта

Воду, газогидрат и скелет пласта будем считать несжимаемыми, а газ – калорически совершенным, тогда:

$$p = \rho_g R_g T. \quad (8)$$

Зависимость равновесной температуры фазовых переходов от давления будет описываться выражением:

$$T = T_0 + T_* \ln(p/p_0). \quad (9)$$

Тогда с учетом (8) и (9) плотность газа будет однозначно определяться величиной текущего давления пласта:

$$\rho_g = p/R_g(T_0 + T_* \ln(p/p_0)).$$

2. Результаты расчетов

Проводились численные эксперименты, иллюстрирующие процесс разложения газогидратного пласта со следующими характерными линейными размерами, а также значениями параметров, определяющих начальное состояние пласта: $R = 3000$ м, $H = 50$ м, $m = 0.25$, $S_{h0} = 0.4$, $p_0 = 7.4$ МПа, $T_0 = T_s(p_0) = 283.6$ К.

Для параметров, определяющих теплофизические свойства гидрата, скелета, воды и газа были приняты следующие величины: $\rho_h = 910$ кг/м³, $\rho_{sc} = 2320$ кг/м³, $\rho_l = 1000$ кг/м³, $l = 5 \cdot 10^5$ Дж/кг, $G = 0.12$, $T_* = 10$ К, $\lambda = 6.43$ Дж/(м·с·К), $c_l = 4200$ Дж/(кг·К), $c_{sc} = 920$ Дж/(кг·К), $R_g = 520$ Дж/(кг·К).

Для представленных значений параметров пласта, запас газа в нем составляет $M_{g0} = 2.6 \cdot 10^7$ т.

На графиках представлена динамика пластового давления и гидратонасыщенности в пласте (рис. 2). Отбор газа происходил в режиме постоянного массового расхода при $Q_g^{(m)} = 2.6 \cdot 10^6$ т/год.

Из графиков видно, что при таком темпе добычи газа достижение пластового давления значения $p = 2.6$ МПа и соответственно температуры $T = 273$ К произошло примерно за 5 лет. При этом при разложении газогидратного пласта его насыщенность уменьшается от значения 0.4 до 0.25.

3. Заключение

Была построена и рассмотрена математическая модель процесса разложения газогидратного пласта без воздействия каких-либо внешних источников. Показано, что при отборе газа из пласта с радиусом 3000 м и толщиной 50 м его гидратонасыщенность в течение 5 лет уменьшается примерно на 38%.

Список литературы

- [1] Бондарев Э.А., Рожин И.И., Попов В.В., Аргунова К.К. Оценка возможности подземного хранения гидратов природного газа в зоне многолетней мерзлоты // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX, № 4. С. 64–74. <http://www.izdatgeo.ru/pdf/krio/2015-4/64.pdf>
- [2] Чиглинцева А.С., Шагапов В.Ш. К теории вымывания газа из газогидратного массива // Труды Института механики Уфимского научного центра РАН. Уфа: Нефтегазовое дело. 2008. Вып. 6. С. 199–204. DOI: 10.21662/uim2008.1.029
- [3] Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Сыртланов В.Р. О возможности вымывания газа из газогидратного массива посредством циркуляции теплой воды // ПМТФ. 2009. Т. 50, № 4. С. 100–111. DOI: 10.1007/s10808-009-0084-0
- [4] Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Русинев А.А. Теоретическое моделирование процесса извлечения газа из пористого газогидратного резервуара частично насыщенного газом с учетом теплового взаимодействия с окружающими породами // ТОХТ. 2016. № 4. С. 45–55. DOI: 10.7868/S004035711604014X
- [5] Макогон Ю.Ф., Омельченко Р.Ю. Мессояха – газогидратная залежь, роль и значение // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2012. № 3. С. 5–19. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17960118>



Mathematical modeling of the process of decomposition of gas hydrate formation without the influence of various external sources

Yuziev V.E., Rusinov A.A.

Birsk branch of the Bashkir State University, Birsk

The paper considers a homogeneous reservoir in the form of a pancake with characteristic linear dimensions corresponding to real deposits: with a radius of the order of several kilometers, and a height of tens of meters. Since the radii of such layers are much larger than their thickness, this allows one to take into account the thermal interactions of the field with the surrounding rocks through the upper and lower boundaries of the layer in a flat one-dimensional approximation. To describe the model, such basic equations were used as the law of conservation of mass of gas and water in the reservoir, the equation of heat balance and temperature fields near the reservoir boundary, as well as initial and boundary conditions. The constructed theoretical model makes it possible to analyze the possibility of realizing the complete gas recovery of the layers only due to the thermal reserve of the hydration layers themselves, as well as the surrounding mountain massif. For the values of the parameters that determine the initial state of the board, numerical experiments were performed. The dynamics of reservoir pressure and hydrate saturation in the reservoir are presented. As a result of the research, it was established that at a constant gas extraction rate, the achievement of reservoir pressure up to 2.6 MPa and, accordingly, a temperature of 273 K occurred in about 5 years. It is shown that when gas is taken from a reservoir with a radius of 3000 m and a thickness of 50 m, its hydrate saturation decreases by about 38% over 5 years.

Keywords: gas hydrate, porous medium, phase transition

References

- [1] Bondarev E.A., Rozhin I.I., Popov V.V., Argunova K.K. Assessment of possibility of natural gas hydrates underground storage in permafrost regions // *Earth's Cryosphere*. 2015. Vol. XIX. No 4. Pp. 64–74 (in Russian).
<http://www.izdatgeo.ru/pdf/krio/2015-4/64.pdf>
- [2] Chiglintseva A.S., Shagapov V.Sh. About of the theory of washing away of gas from of the gashydrate massi // *Proceedings of the Institute of Mechanics of Ufa Branch of RAS*. 6 (2008). Pp. 199–204 (in Russian).
DOI: 10.21662/uim2008.1.029
- [3] Shagapov V.Sh., Chiglintseva A.S., Syrtlanov V.R. Possibility of gas washout from a gas-hydrate massif by circulation of warm water // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2009. Vol. 50. No 4. Pp. 628–637.
DOI: 10.1007/s10808-009-0084-0
- [4] Shagapov V.S., Chiglintseva A.S., Rusinov A.A. Theoretical modeling of gas extraction from a partially gas-saturated porous gas-hydrate reservoir with respect to thermal interactions with surrounding rocks // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2016. Vol. 50. No 4. Pp. 449–458 (in Russian).
DOI: 10.7868/S004035711604014X
- [5] Makogon Yu.F., Omel'chenko P.Yu. [Messoyakha – gas hydrate deposit, role and significance] *Geologiya i poleznie ickopaemye [Geology and useful minerals of the world ocean]*. 2012. № 3. Pp. 5–19 (in Russian).
<https://elibrary.ru/item.asp?id=17960118>