

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ПЛАЗМЫ

© В. Ш. ШАГАПОВ,¹
А. С. ЧИГЛИНЦЕВА,² А. А. РУСИНОВ²

¹ФГБУН Институт механики и машиностроения
Казанского научного центра РАН

²Бирский филиал Башкирского государственного университета
shagapov@rambler.ru, changelina@rambler.ru,
irtysh2009@mail.ru

УДК 532.546

ОПИСАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГАЗОГИДРАТНЫХ ПЛАСТОВ

DESCRIPTION OF HYDRODYNAMIC AND THERMAL FIELDS AT GAS HYDRATE RESERVOIR PRODUCTION*

В работе построена теоретическая модель и проанализирована возможность добычи газа из газогидратных пластов только за счет тепловых резервов как самих месторождений, так и окружающих пласт горных пород. Поскольку, согласно геологическим данным, радиусы месторождений составляют порядка десятка километров, а их толщина — несколько десятка метров, то в работе рассматривается гипотетический однородный пласт в форме цилиндра с характерными линейными размерами, соответствующими реальным залежам. Предполагается, что газогидратный пласт частично насыщен газогидратом и частично — газом в свободном состоянии. Выявлено, что темп снижения гидратонасыщенности в период консервации значительно ниже, чем в период отбора газа. Изучено влияние толщины пластов на эволюцию газогидратного пласта. Установлено, что для пластов толщиной в несколько десятков метров наименьшее время эксплуатации месторождения, необходимое для полного разложения гидрата, наблюдается при циклическом режиме, когда режим отбора газа чередуется последующей консервацией месторождения.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-11-20022).

The paper presents the theoretical model and opportunity analysis of the gas production from gas hydrate reservoirs only by means of thermal reserves of both fields and surrounding rock formations. Since, according to the geologic data, the field radii are typically within the order of ten kilometers, and the field thickness — several tens of meters, in this paper we consider a hypothetical homogeneous reservoir in the form of a pancake with characteristic linear dimensions corresponding to the real fields. It is expected that the gas hydrate reservoir is partially saturated with gas hydrates and free gas. It is revealed that the rate of decline of hydrate saturation in the period of field deactivation is much lower than in the period of gas extraction. The influence of the formation thickness on the development of the gas hydrate reservoir is studied. For the reservoirs with the thickness of several tens of meters, the minimum time of field exploitation required for the complete decomposition of hydrates is observed in cyclic operation, when the regime of gas extraction alternates the following field deactivation.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Газогидратное месторождение, разгерметизация, консервация месторождения.

KEY WORDS. Gas hydrate field, loss of containment, field deactivation.

Введение

Согласно последним данным [3, 4], значительная часть газогидратных залежей находится в подземных пластах. Так, на сегодняшний день, самыми известными и наиболее изученными газогидратными месторождениями являются Мессояхское (Россия), Маллик (Канада) и Нанкай (Япония) [4, 8, 9]. Добыча газа из таких пластов всегда сопряжена подводом тепла, необходимого для разложения гидратов. Представляется, что при низких темпах эксплуатации пластов, тепловые затраты можно возобновлять за счет геотермального тепла самого пласта и, частично, за счет отбора тепла из окружающих горных пород.

Пусть пласт с пористостью m в исходном состоянии частично насыщен газогидратом и частично — газом в свободном состоянии. Тогда, тепло, необходимое для полного разложения газогидрата, находящегося в единице объема пласта, составляет величину $mS_h\rho_h l$, где ρ_h , l и S_h — плотность, удельная теплота разложения газогидрата и гидратонасыщенность. Полагаем, что начальное значение температуры пласта T_0 и давление p_0 находятся на кривой фазового равновесия системы «газ + гидрат + вода». При дальнейшем медленном снижении давления, так, чтобы температура пласта могла проследить за равновесным значением $T_s(p)$ для текущего пластового давления, пласт отдает тепло $\rho c (T_0 - T_s(p))$ (ρc — объемная теплоемкость пласта). Причем наименьшее значения давления, до которого его можно снижать, равно значению, при котором соответствующая равновесная температура равна точке замерзания воды. Полагаем, что отбираемое тепло идет на разложение газогидрата, записываем условие баланса тепла:

$$\rho c (T_0 - T_s(p_e)) = m\rho_h (S_{h0} - S_{he})l.$$

Здесь S_{hi} ($i = 0, e$) — гидратонасыщенность для исходного и конечного состояний. Для того, чтобы температурного запаса пласта хватало на полное разложение газогидрата, должно выполняться условие:

$$S_{h0} \leq S_{h*} = \frac{\rho c \Delta T}{m\rho_h l}.$$

Так, при значении параметров для газогидрата метана [2, 10]: $\rho = 910 \text{ кг/м}^3$, $l = 5 \times 10^5 \text{ Дж/кг}$ и характерных значениях параметра пласта: $\rho c = 2 \times 10^6 \text{ Дж/(м}^3\text{К)}$, $m = 0.25$, $\Delta T = 10^\circ\text{К}$ имеем $S_{h*} \approx 0.2$. Таким образом, если исходная гидратонасыщенность меньше этого значения, то теплового запаса самого пласта вполне хватает на полное разложение гидрата, находящегося в пласте. Если же это условие не выполняется, то выше введенного температурного запаса $\Delta T = T_0 - T_s(p_e)$ хватает лишь для снижения гидратонасыщенности до величины $S_{he} = S_{h0} - \rho c \Delta T / m \rho_h l$. Представляется, что в случае высокой гидратонасыщенности эффективной мерой для осуществления более полной газоотдачи таких залежей, является консервация пластов [1, 4] на некоторый период после их эксплуатации. При этом, к началу консервации месторождения, давление в нем должно быть ниже равновесного значения фазовых переходов. В период консервации температура и давление в месторождении будут повышаться за счет поступления тепла из горных пород и разложения гидрата [6].

Пусть имеется однородный пласт в форме цилиндра (рис. 1). Согласно геологическим данным [4], радиусы R пласта составляют порядка десятка километров, а толщина H — десятки метров. Это позволяет учесть тепловые взаимодействия месторождения с породами через верхнюю и нижнюю границы пласта. Гидратонасыщенность по всей толщине пласта, а также начальную температуру пласта и окружающих горных пород положим однородными. Примем, что к началу разработки месторождения искомое давление равно равновесному давлению для исходной температуры пласта. В процессе отбора газа давление и температуру в пласте полагаем однородными. Понижение давления в пласте приводит к снижению его температуры и к изменению температурных полей в нем и окружающих породах.

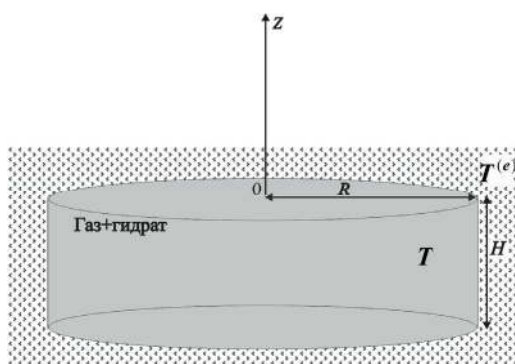


Рис. 1. Схема газогидратного пласта

Основные уравнения

В процессе разработки газогидратного пласта его состояние также будет характеризоваться текущими значениями гидратонасыщенности S_h , газонасыщенности S_g , а также насыщенностью воды S_l , образовавшейся при разложении газогидрата, и связаны как:

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

Для величин общего запаса газа M_g в пласте можем записать:

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

где ρ_i — плотности фаз, G — массовое содержание газа в составе гидрата.

Аналогично (2) можем записать для массы M_l воды в пласте:

$$M_l = \pi R^2 H m (\rho_l S_l + (1 - G) \rho_h S_h). \quad (3)$$

Запишем уравнения сохранения масс газа и воды в пласте:

$$\frac{dM_g}{dt} = -Q_g^{(m)}, \quad \frac{dM_l}{dt} = 0. \quad (4)$$

Здесь $Q_g^{(m)}$ — общий массовый расход отбора газа из месторождения. Согласно второму уравнению из (4), общая масса воды будет постоянной:

$$M_l = M_{l0}. \quad (5)$$

Полагая, что в исходном 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) получим:

$$\rho_l S_l + (1 - G) \rho_h S_h = (1 - G) \rho_h S_{h0}. \quad (6)$$

Отсюда, для текущего значения водонасыщенности S_l имеем:

$$S_l = (1 - G) \rho_h (S_{h0} - S_h) / \rho_l. \quad (7)$$

Подставляя выражение (7) в (1), для газонасыщенности имеем:

$$S_g = 1 - S_h - (1 - G) \rho_h (S_{h0} - S_h) / \rho_l. \quad (8)$$

В рамках принятой модели запишем уравнения баланса тепла как:

$$\pi R^2 H \rho c \frac{dT}{dt} = \pi R^2 H m \rho_h l \frac{dS_h}{dt} + 2\pi R^2 q^{(T)}, \quad (9)$$

$$q^{(T)} = \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \Big|_{z=0}, \quad (10)$$

где $q^{(T)}$ — тепловой поток с единицы площади поверхности пласта, λ — коэффициент теплопроводности горного массива. Первое слагаемое в правой части (9) выражает тепловые затраты на разложение газогидрата, а второе — интенсивность потока тепла в пласт из горного массива. Причем принято, что температурное поле сверху и снизу месторождения симметрично. Это означает, что основной перепад температуры между пластом и породами определяется снижением температуры пласта при отборе газа, сопровождаемого тепловыми затратами на разложение газогидрата. Для определения теплового потока на пласт от окружающего горного массива, запишем уравнение для описания температурных полей вблизи границы пласта в плоскооднмерном приближении [5] как:

$$\rho c \frac{\partial T'}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T'}{\partial z^2}, \quad (z > 0). \quad (11)$$

Полагаем, что к началу эксплуатации месторождения температура в пласте и окружающего массива однородна и равна T_0 . Примем также, что в процессе разработки месторождения температурные перепады реализуются в достаточно тонких слоях по сравнению с линейными размерами пласта.

Запишем начальные и граничные условия для уравнения (11):

$$z \geq 0, t \leq 0: T' = T_0; \quad z = 0, t > 0: T' = T_s(p); \quad z = \infty, t > 0: T' = T_0. \quad (12)$$

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

$$p = \rho_g R_g T. \quad (13)$$

Для равновесной температуры фазовых переходов примем [7]:

$$T = T_0 + T_* \ln(p/p_0). \quad (14)$$

На основании (13) и (14) плотность газа будет определяться как:

$$\rho_g = \frac{p}{R_g (T_0 + T_* \ln(p/p_0))}. \quad (15)$$

Результаты расчетов

Проводились численные эксперименты, иллюстрирующие разработку месторождения со следующими параметрами: $R = 7500$ м, $H = 40$ м, $m = 0.25$, $S_{ho} = 0.4$, $p_0 = 7.4$ МПа, $T_0 = 283.6$ К. На рис. 2 представлены динамика гидратонасыщенности и пластового давления, эволюция температурных полей в пласте и вокруг него, а также масса отбираемого газа. Эксплуатация месторождения производилась в циклическом режиме, согласно которому извлечение газа чередуется последующей консервацией месторождения. Отбор газа до достижения пластового давления и температуры величин $p = 2.6$ МПа и $T = 273$ К производился в режиме постоянного массового расхода при $Q^{(m)} = 1.3 \times 10^7$ т/год. Видно, что при таком темпе добычи газа снижение температуры пласта до 0°C градусов по Цельсию произошло примерно за пять лет. При этом суммарная масса добытого газа составила около половины общего начального запаса, снижение гидратонасыщенности произошло примерно на 40%. Далее, в период консервации месторождения, в течение десяти лет шло повышение температуры до значения $T = 278$ К и восстановление давления до $p = 4$ МПа. Интересно отметить, что в период консервации за счет теплого потока из окружающих горных пород происходит восстановление температуры месторождения, а также частично разложение оставшегося в пласте газогидрата. При этом темп снижения гидратонасыщенности в период консервации значительно ниже, чем в период отбора газа. Таким образом, полное разложение гидрата для принятого режима эксплуатации месторождения происходит примерно за сорок лет. Масса извлеченного газа за это время составила порядка 80% от исходного запаса газа в гидратном пласте.

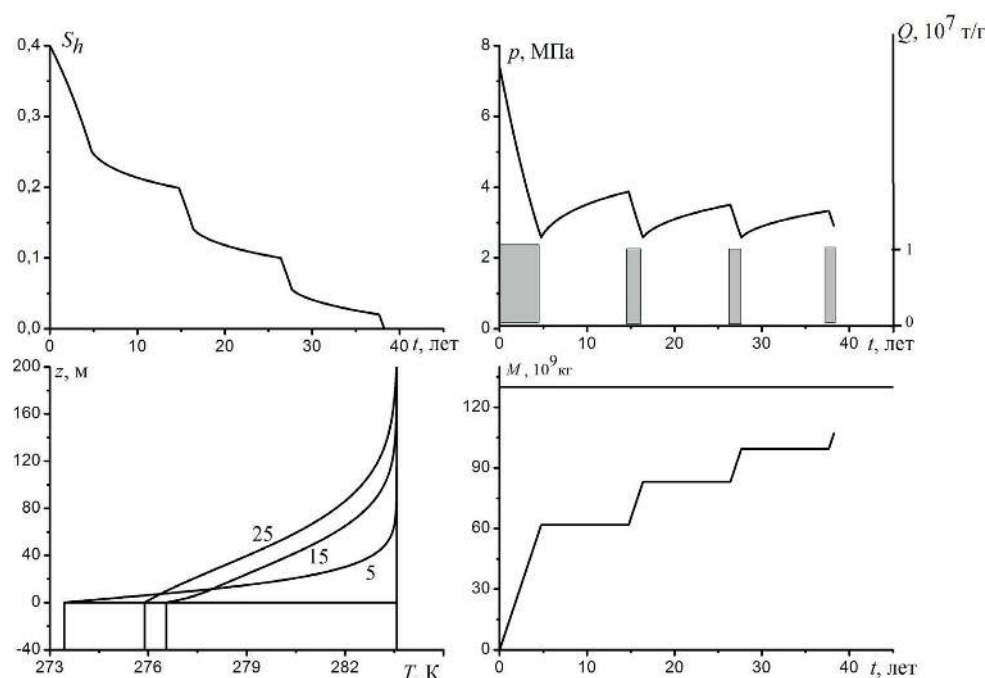


Рис. 2. Эволюция гидратонасыщенности пласта, пластового давления, температуры гидратного пласта и окружающего грунта, массы отбираемого газа (числа на кривых соответствуют времени в годах)

Закключение

На основе предложенной теоретической модели и численных экспериментов была проанализирована возможность реализации полной газоотдачи газогидратных пластов только за счет собственного тепла, а также тепла окружающих пласт горных массивов. Установлено, что для пластов толщиной в несколько десятков метров наиболее полный отбор газа, включая долю, входящую в состав гидрата, без подвода внешних энергетических источников можно осуществить примерно за пятьдесят лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Даровских С. В. Промышленно-геологические особенности Мессояхского газогидратного месторождения / С. В. Даровских, И. В. Крохалев, С. Ф. Мулявин // Вестник Недропользователя ХМАО. № 18. 2007. С. 47-53.
2. Дмитриевский А. Н. Газогидраты морей и океанов — источники углеводородов будущего / А. Н. Дмитриевский, И. Е. Баланюк. М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2009. 416 с.
3. Макогон Ю. Ф. Гидраты природных газов / Ю. Ф. Макогон. М.: Недра, 1974. 208 с.
4. Макогон Ю. Ф. Мессояха — газогидратная залежь, роль и значение / Ю. Ф. Макогон, Р. Ю. Омельченко // Геология и полезные ископаемые Мирового океана, 2012, №3. С. 5-19.

5. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред / Р. И. Нигматулин. М.: Наука, 1987. Т. 1. 464 с.
6. Сухоносенко А. Л. Термогидродинамическое моделирование процессов разработки газогидратных месторождений: диссертация канд. техн. наук / А. Л. Сухоносенко. М., 2013. 145 с.
7. Шагапов В. Ш. О возможности вымывания газа из газогидратного массива посредством циркуляции теплой воды / В. Ш. Шагапов, А. С. Чиглинцева, В. Р. Сыртланов // Прикладная механика и техническая физика. 2009. Т. 50. № 4. С. 100-111.
8. Grover T. Analysis of reservoir performance of Messoyakha Gas hydrate Field / T. Grover, G. Moridis, S. Holditch // Proceedings of the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference Vancouver, BC, Canada (July 6-11, 2008). Pp. 49-56.
9. Moridis G. J. Depressurization-Induced Gas Production from Class 1 Hydrate Deposits / G. J. Moridis // SPE 97266, presented at SPE ATCE. Dallas, 2005.
10. Sloan E. D., Koh C. A. Clathrate hydrates of natural gases / E. D. Sloan, C. A. Koh. 3rd ed. CRC Press, Taylor & Francis group, 2008. 119 p.

REFERENCES

1. Darovskikh S. V., Krohalev I. V., Muljavin S. F. Promyslovo-geologicheskie osobennosti Messojahskogo gazogidratnogo mestorozhdenija [Production and Geological Characteristics of Messoyakhskiy Gas Hydrate Field] // Vestnik Nedropol'zovatelja HMAO [Herald of Subsurface User of Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug]. 2007. No 18. Pp. 47-53. (In Russian)
2. Dmitrievskij A. N., Balanjuk I. E. Gazogidraty morej i okeanov — istochniki uglevodorodov budushhego [Gas-hydrates of Seas and Oceans — Future Sources of Hydrocarbons]. M.: Gazprom, 2009. 416 p. (In Russian)
3. Makogon Ju. F. Gidraty prirodnyh gazov [Natural Gas Hydrates]. M.: Nedra, 1974. 208 p. (In Russian)
4. Makogon Ju. F., Omel'chenko R. Ju. Messojaha — gazogidratnaja zalez', rol' i znachenie [Messoyakha — Gas Hydrate Deposit, Role and Value] // Geologija i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana [Geology and Mineral Resources of the World Ocean]. 2012. No 3. Pp. 5-19. (In Russian)
5. Nigmatulin R. I. Dinamika mnogofaznyh sred [Dynamics of Multiphase Media. Vol. 1]. M.: Nauka [Science], 1987. Т. 1. 464 p. (In Russian)
6. Suhonosenko A. L. Termogidrodinamicheskoe modelirovanie processov razrabotki gazogidratnyh mestorozhdenij: diss. kand. tehn. nauk [Thermohydrodynamic Modeling of the Development of Gas Hydrate Deposits: Diss. Cand. Sci. (Engin.)]. M., 2013. 145 p. (In Russian)
7. Shagapov V. Sh., Chiglinceva A. S., Syrtlanov V. R. O vozmozhnosti vymyvaniya gaza iz gazogidratnogo massiva posredstvom cirkuljacii teploj vody [On the Possibility of Washing of Gas from Gas Hydrate solid by Circulating Warm Water] // Prikladnaja mehanika i tehniceskaja fizika [Applied Mechanics and Technical Physics]. 2009. Vol. 50. No 4. Pp. 100-111. (In Russian)
8. Grover T., Moridis G., Holditch S. Analysis of reservoir performance of Messoyakha Gas hydrate Field // Proceedings of the Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference Vancouver, BC, Canada (July 6-11, 2008). Pp. 49-56.
9. Moridis G. J. Depressurization-Induced Gas Production from Class 1 Hydrate Deposits // SPE 97266, presented at SPE ATCE. Dallas, 2005.

10. Sloan E.D., Koh C.A. Clathrate hydrates of natural gases. 3rd ed. CRC Press, Taylor & Francis group, 2008. 119 p.

Авторы публикации

Шагапов Владислав Шайхулагамович — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института механики и машиностроения Казанского научного центра РАН

Чиглинцева Ангелина Сергеевна — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей и прикладной математики Бирского филиала Башкирского государственного университета

Русинов Алексей Александрович — кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры высшей и прикладной математики Бирского филиала Башкирского государственного университета

Authors of the publication

Vladislav Sh. Shagapov — Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Chief Research Officer at the Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Science Center, Russian Academy of Sciences

Angelina S. Chiglintseva — Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor at the Department of Higher and Applied Mathematics, Birsik Branch of Bashkir State University

Aleksey A. Rusinov — Cand. Sci. (Phys. and Math.), Teaching Assistant at the Department of Higher and Applied Mathematics, Birsik Branch of Bashkir State University