ПРИ ОТБОРЕ ГАЗА

Хасанов М.К., Доровская М.С.

Стерлитамакский филиал ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», Стерлитамак, e-mail: mari-animiya@mail.ru

Рассмотрены особенности разложения газогидратов при отборе газа из пористой среды, в исходном состоянии заполненной газом и гидратом. В автомодельном приближении получено аналитическое решение залачи с учетом конвективного переноса тепла. Показана возможность существования решений, согласно которым разложение газогидрата может происходить как на фронтальной поверхности, так и в объемной области. Определены критические значения давления, определяющего возникновение объемной области диссоциации газогидрата. Показано, что для высокопроницаемых пористых сред величина данного давления с высокой степенью точности совпадает с величиной равновесного давления гидратообразования, соответствующего исходной температуре пласта. Установлено, что фронтальный режим разложения газогидрата реализуется в низкопроницаемых пористых средах, а также в низкотемпературных пластах с высоким пластовым давлением, т.е. в пластах, исходное состояние гидрата в которых далеко от условий его разложения.

Ключевые слова: газовый гидрат, диссоциация, автомодельное решение, пористая среда

DISSOCIATION DYNAMICS OF GAS HYDRATES IN POROUS MEDIA WITH GAS SAMPLING

Khasanov M.K., Dorovskaja M.S.

Sterlitamak branch of Bashkir State University, Sterlitamak, e-mail: mari-animiya@mail.ru

Features of decomposition of gas hydrates are considered at gas selection from the porous environment, in an initial state filled with gas and hydrate. In automodel approach the analytical solution of a task taking into account convective transfer of heat is received. Possibility of existence of decisions according to which decomposition of gas hydrate can happen both on a frontal surface, and in volume area is shown. Critical values of pressure defining emergence of volume area of dissociation of gas hydrate are defined. It is shown that for high-permeability porous environments, the size of this pressure with a fine precision coincides with the size of equilibrium pressure of the hydrate formation corresponding to initial temperature of layer. Found that frontal mode decomposition hydrate implemented in low porous media as well as in low-temperature reservoirs with high reservoir pressure, ie in layers, the initial state of hydrate, which is far from the conditions of its expansion.

Keywords: gas hydrate, dissociation, self-similar solution, porous medium

Проблемы и задачи разложения газогидратов в настоящее время представляют значительный научный и практический интерес, что обусловлено широким распространением газогидратных месторождений в природе и перспективами их использования в качестве источников природного газа [1,3].

УДК 532.546:536.421

Математическая модель процесса разложения газогидрата в пористой среде без учета конвективного переноса тепла построена в работах [2,6,7]. Некоторые особенности процесса образования газогидрата в пористой среде рассмотрены в работах [4,5,8,10]. Математическая модель диссоциации газа в пористой среде при инжекции теплого газа представлена в работе [9]. В настоящей работе представлено решение задачи о диссоциации газогидрата в пористой среде при депрессионном воздействии с учетом конвективного переноса тепла.

Основные уравнения

Для описания процессов тепломассопереноса в пористой среде примем следующие допущения. Процесс однотемпературный, т.е. температуры пористой среды и насыщающего вещества (газа, гидрата или воды) совпадают. Гидрат является двухкомпонентной системой с массовой концентрацией газа G. Кроме того, скелет пористой среды, газогидрат и вода несжимаемы и неподвижны, пористость постоянна, газ является калорически совершенным. В рамках отмеченных допущений запишем для плоскоодномерной задачи уравнения сохранения массы, закон Дарси, уравнения состояния газа и притока тепла (без учета баротермического эффекта):

$$\frac{\partial}{\partial t}(mS_{g}\rho_{g}) + \frac{\partial}{\partial x}(S_{g}m\upsilon_{g}\rho_{g}) = -mG\rho_{h}\frac{\partial S_{h}}{\partial t},$$
$$\frac{\partial}{\partial t}(mS_{j}\rho_{j}) = -m(1-G)\rho_{h}\frac{\partial S_{h}}{\partial t},$$

$$mS_{g}\upsilon_{g} = -\frac{k_{g}}{\mu_{g}}\frac{\partial p}{\partial x},$$

$$p = \rho_{g}R_{g}T,$$

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t} + \rho_{g}c_{g}mS_{g}\upsilon_{g}\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda\frac{\partial T_{(i)}}{\partial x}\right) + m\rho_{h}L_{h}\frac{\partial S_{h}}{\partial t}.$$
(1)

Здесь *т* – пористость; *р* – давление,

T – температура; ρ_j и S_j – истинная плотность и насыщенность пор *j*-й фазы (*j* = *h*, *l*, *g*); индексы *h*, *l* и *g* относятся к параметрам гидрата, воды и газа соответственно;

 v_{g} , k_{g} и μ_{g} – скорость, проницаемость и динамическая вязкость для газовой фазы;

L_h – удельная теплота разложения гидрата;

 c_g – удельная теплоемкость газа; ρc и λ – удельная объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности системы.

Зависимость коэффициента проница-

емости для газа k_g от газонасыщенности можно задать на основе формулы Козени:

$$k_{g} = k_{*} \frac{(mS_{g})^{3}}{(1 - mS_{g})^{2}} \approx k_{0}S_{g}^{3}(k_{0} = k_{*}m^{3})$$

Значения температуры и давления в области разложения гидрата связаны условием фазового равновесия [1]:

$$T = T_0 + T_* \ln\left(\frac{p}{p_{s0}}\right),$$
 (2)

где T_0 – исходная температура системы;

 p_{s0} – равновесное давление, соответствующее исходной температуре; T_* – эмпирический параметр, зависящий от вида газо-

гидрата. При диссоциации газогидрата в общем случае могут возникнуть три характерные области. В первой области, находящейся вблизи скважины, поры заполнены газом и водой. Во второй (промежуточной) области происходит разложение газогидрата, поэтому здесь поры заполнены газом, водой и гидратом. В третьей (дальней) области присутствуют газ и гидрат. На границах этих областей должны выполняться условия ба-

$$\left[m(S_{h}\rho_{h}(1-G)+S_{l}\rho_{l})\dot{x}_{(S)}\right]=0,$$

ланса массы и тепла:

$$\left[m(\rho_g S_g(\upsilon_g - \dot{x}_{(S)}) - \rho_h S_h G \dot{x}_{(S)}\right] = 0,(3)$$
$$\left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right] = \left[m\rho_h L_h S_h \dot{x}_{(S)}\right].$$

Здесь $\dot{x}_{(S)}$ – скорость движения этой границы. Температуру и давление на этой границе будем полагать непрерывными.

Будем полагать, что полубесконечный пористый пласт в начальный момент времени насыщен газом и гидратом, давление

 p_0 и температура T_0 которых в исходном состоянии соответствуют термодинамическим условиям стабильного существования

гидрата $(p_0 > p_{S0})$ и изначально одинаковы во всем пласте. Эти условия могут быть записаны следующим образом:

$$t = 0$$
: $T = T_0$, $p = p_0$ $(x \ge 0)$

Пусть через границу пласта отбирается газ и одновременно производится нагрев так, что давление и температура поддерживаются на этой границе постоянными:

$$x = 0$$
: $T = T_e$, $p = p_e$ $(t > 0)$.

Аналитическое решение

Сформулированная задача имеет автомодельное решение. Рассмотрим решение с фронтальной поверхностью разложения гидратов. В данном случае возникают две характерные области. В первой области, находящейся вблизи границы пласта, гидрат полностью диссоциировал, поэтому в порах присутствуют только газ и вода. Во второй (дальней) области поры пласта заполнены газом и гидратом. Таким образом, в данном случае разложение газогидрата полностью происходит на фронтальной поверхности между этими областями, а промежуточная область отсутствует.

В автомодельных переменных решение для распределения давления (после применения метода линеаризации Лейбензона) и температуры в каждой из областей может быть записано в виде:

$$p_{(1)}^{2} = p_{(s)}^{2} + \frac{\left(p_{e}^{2} - p_{(s)}^{2}\right)\int_{\xi}^{\xi_{(s)}} \exp\left(-\frac{\xi^{2}}{4\eta_{(1)}}\right)d\xi}{\int_{0}^{\xi_{(s)}} \exp\left(-\frac{\xi^{2}}{4\eta_{(1)}}\right)d\xi}, \quad 0 < \xi < \xi_{(s)},$$

$$T_{(1)} = T_{(s)} + \frac{\left(T_{e} - T_{(s)}\right)\int_{\xi}^{\xi_{(s)}} \exp\left(-\frac{\xi^{2}}{4} - \frac{\operatorname{Pe}_{(1)}}{2p_{0}^{2}}p_{(1)}^{2}\right)d\xi}{\int_{0}^{\xi_{(s)}} \exp\left(-\frac{\xi^{2}}{4} - \frac{\operatorname{Pe}_{(1)}}{2p_{0}^{2}}p_{(1)}^{2}\right)d\xi}, \quad 0 < \xi < \xi_{(s)}; \qquad (4)$$

$$p_{(2)}^{2} = p_{0}^{2} + \frac{\left(p_{(s)}^{2} - p_{0}^{2}\right)\int_{\xi}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^{2}}{4\eta_{(2)}}\right)d\xi}{\int_{\xi_{(s)}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^{2}}{4\eta_{(2)}}\right)d\xi}, \quad \xi_{(s)} < \xi < \infty,$$

$$T_{(2)} = T_{0} + \frac{\left(T_{(s)} - T_{0}\right)\int_{\xi}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^{2}}{4} - \frac{\operatorname{Pe}_{(2)}}{2p_{0}^{2}}p_{(2)}^{2}\right)d\xi}{\int_{\xi_{(s)}}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^{2}}{4} - \frac{\operatorname{Pe}_{(2)}}{2p_{0}^{2}}p_{(2)}^{2}\right)d\xi}, \quad \xi_{(s)} < \xi < \infty, \qquad (5)$$

$$T_{He} \eta_{(i)} = \frac{\aleph_{(i)}^{(i)}}{\aleph_{(i)}^{(T)}}, \quad \aleph_{(i)}^{(p)} = \frac{k_{(i)}p_{0}}{\mu_{g}mS_{g(i)}}, \quad \operatorname{Pe}_{(i)} = \frac{\rho_{g0}c_{g}}{\lambda}\frac{k_{(i)}p_{0}}{\mu_{g}}.$$

Параметры первой и второй областей снабжены нижними индексами в скобках i = 1, 2.

На поверхности, разделяющей ближнюю и дальнюю области, происходит ска-

чок гидратонасыщенности от $S_h^- = 0$ до

 $S_{h}^{+} = v$, где v – исходная гидратонасыщенность пласта.

Для значений температуры и давления на границе между областями выполняется условие фазового равновесия (2).

На основе решений (4), (5) и условий баланса массы и тепла на фронтальной границе разложения гидрата (3) получена система трансцендентных уравнений, исходя из которой численно определяются автомо-

дельная координата $\xi_{(S)}$ данной границы и

значения параметров $p_{(s)}$ и $T_{(S)}$ на ней. Полученные решения исследованы на

Полученные решения исследованы на условие термодинамической непротиворечивости, которое состоит в том, что локальная температура в первой (ближней) области должна быть выше локальной температуры разложения гидрата, вычисляемой по найденному в процессе решения распределению давления. Соответственно, температура во второй (дальней) области должна быть ниже данной равновесной температуры.

Результаты расчетов

На рис. 1 приведены распределения температуры и давления для разных значений давления, под которым метан откачивается из пласта. Для параметров, характеризующих систему, приняты следующие значещих систему, приняты следующие значения: $m = 0.1, G = 0.12, S_0 = 0.2, p_0 = 7$ МПа, $T_0 = 280$ К, $T_* = 10^{0}$ К, $p_{s0} = 5.5$ МПа, $k_0 = 10^{-14}$ м², $R_g = 520$ Дж/(К·кг), $p_h = 900$ кг/ м³, $p_l = 1000$ кг/ м³, $c_s = 1560$ Дж/(К·кг), $p_c = 2.5 \cdot 10^{-14}$ Дж/ (К·кг), $\lambda = 2$ Вт/(м·К), $\mu_n = 10^{-5}$ кг/(м·с), L = 5·10⁵ Дж/кг. Штриховая линия 2 показывает равновесную температусоответствующую вычисленному py, распределению давления. Рисунок показывает, что при небольшом значении депрессии (случай а) температура пласта перед фронтом диссоциации гидрата (т.е. со стороны первой области) выше равновесной температуры, а за фронтом – ниже этой температуры. Следовательно, в этом случае решение

с фронтальной поверхностью образования гидрата является непротиворечивым. При более высокой величине депрессии (случай *b*) температура пласта за фронтом разложения гидрата (т.е. со стороны второй области) поднимается выше равновесной температуры, что соответствует перегреву гетерогенной смеси газа и гидрата в этой области. Следовательно, в этом случае модель с фронтальной поверхностью диссоциации гидрата не позволяет построить физически непротиворечивое решение. Для устранения этого противоречия необходимо вводить объемную область разложения гидрата.



Рис. 1. Распределение давления, температуры пласта (1) и равновесной температуры (2); $p_e = 6 M\Pi a$ (a) и $p_e = 4 M\Pi a$ (b)

Для определения критического значения давления на границе пласта p_* , ниже которого возникает объемная область разложения гидрата, были проведены вычислительные эксперименты в широком диапазоне параметров. На рис. 2 приведены зависимости величины критического давления от абсолютной проницаемости пласта при разных значениях исходной температуры и давления в пласте. Штриховые линии, параллельные оси абсцисс и являющиеся горизонтальными асимптотами сплошных кривых, показывают равновесные давления p_{so} , соответствующие исходным температурам пласта. Графики показывают, что

для высокопроницаемой пористой среды значение критического давления практически совпадает со значением равновесного давления, соответствующего исходной температуре пласта. При уменьшении проницаемости величина критического давления снижается, причем тем быстрее, чем ниже исходная пластовая температура и чем выше исходное пластовое давление. Следоваельно, фронтальный режим реализуется в низкопроницаемых пористых средах, а также в низкотемпературных пластах с высоким пластовым давлением, т.е. в пластах, исходное состояние гидрата в которых далеко от условий его разложения.



а – начальной температуры пласта: $T_0 = 280 \text{ K}(1) \text{ u } 278 \text{ K}(2);$ b – начального давления в пласте: $p_0 = 6 \text{ MПa}(1) \text{ u } 8 \text{ MПa}(2)$

FUNDAMENTAL RESEARCH № 9, 2014

Выводы

Основываясь на проведенных численных расчетах, можно сделать вывод о том, что при отборе газа возможны два принципиально различных режима разложения гидрата. Для величины давления на границе пласта существует некоторое предельное значение, зависящее прежде всего от проницаемости и исходной температуры, ниже которого необходимо рассматривать объемную область разложения гидрата. Для значений проницаемости, характерных для реальных пластов $k = 10^{-12} - 10^{-15} \, \text{м}^2$ и высокопроницаемых пористых сред, величина этого предельного давления с высокой степенью точности совпадает с величиной равновесного давления p_{s0} , соответствующего исходной температуре.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований.

Список литературы

1. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. – М.: Химия, 1980. – 296 с.

2. Васильев В.И., Попов В.В., Цыпкин Г.Г. Численное исследование разложения газовых гидратов, сосуществующих с газом в природных пластах // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2006. – № 4. – С. 127–134.

3. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. – М.: Недра, 1992. – 236 с.

4. Хасанов М.К., Столповский М.В., Кильдибаева С.Р. Численное моделирование образования газогидрата в пористой среде при инжекции газа // Вестник Башкирского университета. – 2013. – Т. 18, №4. – С. 969–972.

5. Хасанов М.К., Гималтдинов И.К., Столповский М.В. Особенности образования газогидратов при нагнетании холодного газа в пористую среду, насыщенную газом и водой // Теоретические основы химической технологии. – 2010. – Т. 44, № 4. – С. 442–449.

6. Цыпкин Г.Г. Аналитическое решение нелинейной задачи о разложения газового гидрата в пласте // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2007. – № 5. – С. 133–142.

7. Цыпкин Г.Г. Математическая модель диссоциации газовых гидратов, сосуществующих с газом в пластах // Доклады РАН. – 2001. – Т. 381, № 1. – С. 56–59.

8. Шагапов В.Ш. Численное моделирование образования газогидрата в пористой среде конечной протяженности при продувке газом / Хасанов М.К., Гималтдинов И.К., Столповский М.В. // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т. 52, №4. – С.116 – 126.

9. Шагапов В.Ш. Особенности разложения газовых гидратов в пористых средах при нагнетании теплого газа / Хасанов М.К., Гималтдинов И.К., Столповский М.В. // Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – Т. 20, № 3. – С. 347–354. 10. Шагапов В.Ш., Хасанов М.К., Мусакаев Н.Г. Образование газогидрата в пористом резервуаре, частично насыщенном водой, при инжекции холодного газа // Прикладная механика и техническая физика. – 2008. – Т.49, №3. – С. 462–472.

References

1. Byk S.Sh., Makogon Yu.F., and Fomina V.I., Gas Hydrates [in Russian], Khimiya, Moscow, 1980.

2. Vasilev V.I., Popov V.V. and Tsypkin G.G., Numerical investigation of the decomposition of gas hydrates coexisting with gas in natural reservoirs, Fluid Dynamics, 2006, Vol. 41, no 4, PP. 599–605.

3. Istomin V.A. and Yakushev V.S., Gas Hydrates in Nature [in Russian], Nedra, Moscow, 1992.

4. Khasanov M. K., Stolpovsky M. V. and Kildibayev S.R. Numerical modeling of formation of gas hydrate in the porous environment at gas injection, The Messenger of the Bashkir university, 2013, Vol. 18, no 4, PP. 969–972.

5. Khasanov M.K., Gimaltdinov I.K. and Stolpovsky M.V., Specific features of the formation of gas hydrates during the injection of a cold gas into a porous medium saturated with a gas and water, Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2010, Vol. 44, no 4, PP. 424–431.

6. Tsypkin G.G., Mathematical model for dissociation of gas hydrates coexisting with gas in strata, Doklady Physics, 2001, Vol. 46, no 11, PP. 806–809.

7. Tsypkin G.G., Analytical solution of the nonlinear problem of gas hydrate dissociation in a formation, Fluid Dynamics, 2007, Vol. 42, no 5, PP. 798–806.

8. Shagapov V. Sh., Numerical modeling of formation of gas hydrate in the porous environment of final extent at a purge gas /Khasanov M.K., Gimaltdinov I.K., Stolpovsky M.V./ Applied mechanics and technical physics, 2011, Vol. 52, no 4, PP. 116–126.

9. Shagapov V.S., The features of gas hydrate dissociation in porous media at warm gas injection /Khasanov M.K., Gimaltdinov I.K., Stolpovsky M.V./ Thermophysics and Aeromechanics, 2013, Vol. 20, no 3, PP. 339–346.

10. Shagapov V.Sh., Khasanov M.K. and Musakaev N.G., Formation of a gas hydrate due to in-jection of a cold gas into a porous reservoir partly saturated by water, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2008, Vol. 49, no 3, PP. 462–472.

Рецензенты:

Мустафина С.А., д.ф.-м.н., профессор, декан физико-математического факультета Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета, г. Стерлитамак;

Михайлов П.Н., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Алгебра, геометрия и методика обучения математике» Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета, г. Стерлитамак.

Работа поступила в редакцию 04.06.2014.