

УДК 532.546:536.421

## ОСОБЕННОСТИ ДОБЫЧИ ГАЗА ИЗ ПОРИСТОГО ПЛАСТА, НАСЫЩЕННОГО ГАЗОГИДРАТОМ

Кильдибаева С.Р.

*Стерлитамакский филиал ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», Стерлитамак, Россия (453100 Стерлитамак, Проспект Ленина 37), e-mail: freya.13@mail.ru.*

Газовые гидраты – кристаллические соединения, образующиеся при особых термобарических условиях, рассматриваются в качестве альтернативного источника энергии. В статье рассматривается математическая модель разложения газогидрата в результате отбора газа из природного пласта, насыщенного в начальный момент времени газом и гидратом. При постановке данной задачи полагается, что в результате отбора газа образуется две характерные области: в первой (ближней) области гидрат полностью разложился на исходные продукты, поэтому в порах присутствуют только газ и вода, вторая (дальняя) область насыщена газом и гидратом. Рассматривается случай, когда фазовые переходы идут на фронтальной поверхности. В результате расчетов получены два решения для разных значений давления. При проведении анализа полученных решений установлено, что основные закономерности разложения газогидратов в пористых пластах зависят от давления и температуры.

Ключевые слова: газогидраты, отбор газа из пласта, добыча газогидратов

## FEATURES OF GAS PRODUCTION FROM POROUS RESERVOIR SATURATED WITH HYDRATE

Kildibaeva S.R.

*Sterlitamak branch of Bashkir State University, Sterlitamak, Russia (453100 Sterlitamak, Prospekt Lenina 37), e-mail: freya.13@mail.ru.*

Gas hydrates - crystalline compounds formed under specific temperature and pressure conditions. Gas hydrates along with shale gas and oil production from offshore are considered as an alternative energy source. The article deals with the mathematical model of gas hydrate decomposition resulted in the selection of natural gas reservoir, saturated at the initial time and gas hydrate. In formulating this problem it is assumed that as a result of the selection of gas produces two distinct areas: the first (near) area, hydrate completely disintegrated on the starting materials, so the pores are present only gas and water, the second (distal) region rich in gas and hydrate. Consider the case where the phase transitions are on the front surface. The calculations obtained two solutions for different values of pressure. Through analysis of the decisions found that the basic laws of decomposition of gas hydrates in porous formations depend on pressure, temperature and hydrate formation, as well as depend on the intensity of gas extraction.

Keywords: gas hydrates, gas extraction from the formation, extraction of gas hydrates

В связи с уменьшением запасов энергоресурсов исследователи многих стран все больше внимания обращают на гидраты природных газов. Газогидраты – твердые кристаллические соединения, образующиеся при низких температурах и высоких давлениях, в их состав входят газ и вода [1]. Уникальной особенностью газогидратов является их особое строение, которое позволяет вмещать в одном кубическом метре газового гидрата в 180 раз больше газа, чем в свободном состоянии [2, 3]. По оценкам специалистов, значительная часть запасов углеводородного сырья находится в газогидратном состоянии, предварительные прогнозы их запасов огромны [2].

Некоторые закономерности процесса образования газогидрата при инъекции газа в пористую среду, частично насыщенную водой, исследованы в работах [4–7]. В данной

работе исследуется математическая модель разложения газогидрата в результате отбора газа из природного пласта, насыщенного газом и гидратом.

Рассмотрим однородный горизонтальный пласт постоянной толщины и длины  $L$ , представляющий собой пористую породу, частично заполненную газогидратом. Кровля и подошва пласта непроницаемы. В пласте пробурена скважина, вскрывшая пласт на всю толщину. Давление  $p_0$  и температура  $T_0$  соответствуют условиям стабильного существования гидрата, т.е.  $T_0 < T_s(p_0)$ , где  $T_s(p_0)$  – равновесная температура, соответствующая исходному давлению системы. Будем полагать, что через левую границу пласта ( $r = r_0$ ) происходит отбор газа под давлением  $p_e$ . При этом температура на ней поддерживается равной значению  $T_e$  (например, с помощью нагревателя, помещенного в забой скважины). Данные параметры соответствуют условиям разложения гидрата ( $T_e > T_s(p_e)$ ) и поддерживаются постоянными в ходе всего процесса диссоциации гидрата.

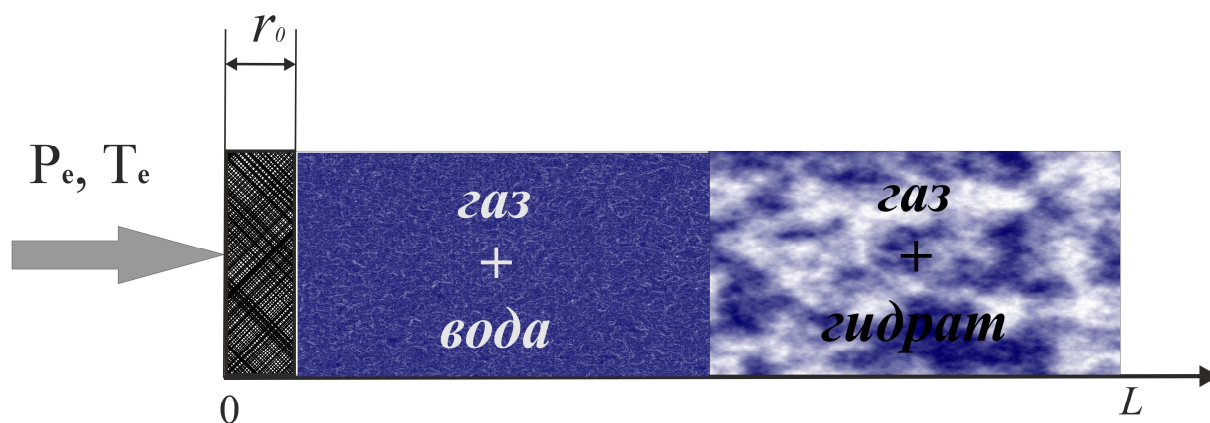


Рис. 1. Постановка задачи

Рассмотрим случай, когда фазовые переходы идут на фронтальной поверхности. В этом случае вглубь пласта начинает распространяться фронтальная поверхность диссоциации гидрата, разделяющая пласт на две области. В первой (ближней) области гидрат полностью разложился на исходные продукты, поэтому в порах присутствуют только газ и вода, вторая (дальняя) область насыщена газом и гидратом.

Система уравнений тепло- и массопереноса в осесимметричном случае для ближней и дальней областей описывается следующим образом:

$$m_{(i)} \frac{\partial \rho_{g(i)}}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_{g(i)} m_{(i)} v_{g(i)}) = 0 \quad (1)$$

$$m S_{g(i)} v_{g(i)} = - \frac{k_{g(i)}}{\mu_g} \frac{\partial p_{(i)}}{\partial r} \quad (2)$$

где  $k_g$  – коэффициент абсолютной проницаемости,  $\mu_g$  – динамическая вязкость газа.

Газ считаем калорически совершенным:

$$p_{(i)} = \rho_{g(i)} R_g T_i \quad (3)$$

Пусть существует граница  $r = r_{(n)}$ , разделяющая ближнюю и дальнюю области, тогда условия баланса масс (воды и газа) и энергии на ней примут вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} m\rho_l S_{l(n)}^- \dot{r}_{(n)} = m\rho_h (1-g) v \dot{r}_{(n)} \\ m\rho_g^- S_{g(n)}^- (v_g^- - \dot{r}_{(n)}) = m\rho_g^+ S_{g(n)}^+ (v_g^+ - \dot{r}_{(n)}) - m\rho_h v g \dot{r}_{(n)} \\ \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{(n)}^+ - \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{(n)}^- = m\rho_h v L_h \dot{r}_{(n)} \end{array} \right. \quad (4)$$

Из первого уравнения системы (4) для величины водонасыщенности на границе диссоциации гидрата (со стороны первой области) получим следующее выражение:

$$S_{l(n)}^- = \frac{\rho_h (1-g) v}{\rho_l} \quad (5)$$

Поскольку согласно принятой модели вода является неподвижной, последнее выражение также определяет величину водонасыщенности в первой области. Применив закон Дарси (2) к системе (4), получим следующие соотношения для определения основных параметров пористой среды на ней:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{k_{g(n)}^+}{\mu_g} \left( \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{(n)}^+ - \frac{k_{g(n)}^-}{\mu_g} \left( \frac{\partial p}{\partial r} \right)_{(n)}^- = m \dot{r}_{(n)} \left( S_{g(n)}^- - S_{g(n)}^+ - \frac{\rho_h g v}{\rho_{g(n)}} \right) \\ \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{(n)}^- - \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{(n)}^+ = m\rho_h v L_h \dot{r}_{(n)} \end{array} \right. \quad (6)$$

Здесь верхние индексы «плюс» и «минус» соответствуют параметрам перед и за фронтом. В частности, для величин газонасыщенности справа и слева от границы фазового перехода имеем следующие выражения:

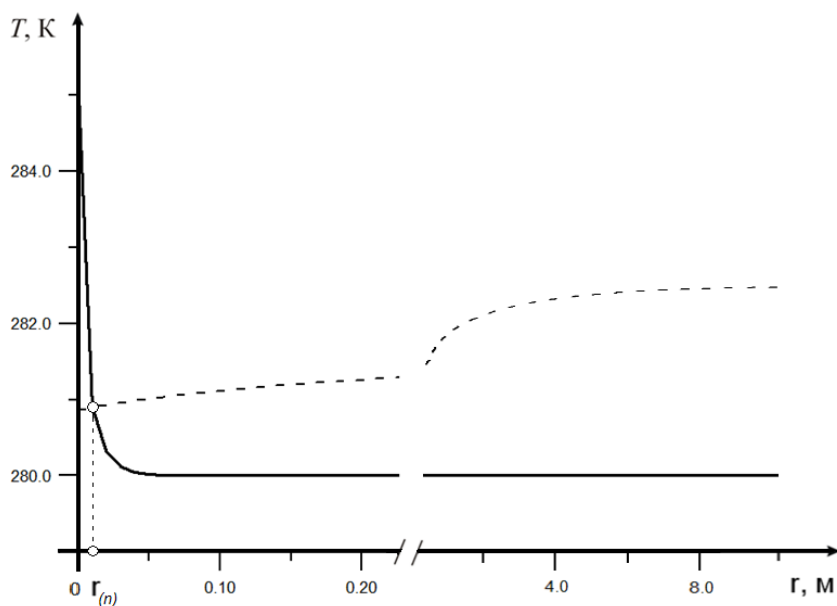
$$S_{g(n)}^- = 1 - \frac{\rho_h (1-g) v}{\rho_l}, \quad S_{g(n)}^+ = 1 - v$$

На правой границе пласта ( $r = L$ ) поставим условия, моделирующие отсутствие потоков массы газа и тепла через нее:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (t > 0, r = L) \quad (7)$$

Постановка осесимметричной задачи относится к классу нелинейных задач математической физики. Поскольку данные задачи определены в областях с неизвестными

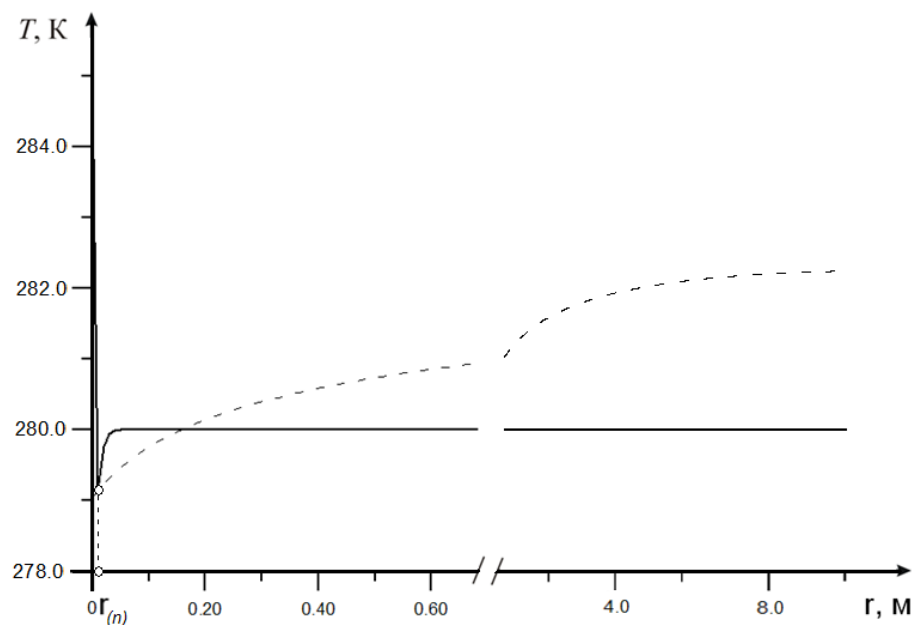
подвижными границами фазовых переходов, то для их решения используется метод ловли фронтов в узлы пространственной сетки.



*Рис. 2. Распределение температуры при отборе газа под давлением  $p_e=5$  МПа.*

*Сплошная и штриховая линии соответствуют температуре пласта и равновесной температуре*

В работе получены решения, описывающие распределения основных параметров в каждой области пласта. В результате анализа полученных решений установлены основные закономерности разложения газогидратов в пористых пластах в зависимости от давления, температуры и гидратонасыщенности пласта, а также в зависимости от интенсивности отбора газа. Получены распределения температур при отборе газа под давлением  $P_e=5$  МПа (рис. 2) и  $P_e=6$  МПа (рис. 3). Как следует из рисунка 2, температура пласта перед фронтом диссоциации гидрата выше, а за фронтом — ниже равновесной температуры. Таким образом, решение с фронтальной границей разложения гидрата является термодинамически непротиворечивым. Из рисунка 3 следует, что температура пласта за фронтом разложения гидрата поднимается выше равновесной температуры (пунктирная линия). Таким образом, при данных значениях невозможно построить физически непротиворечивую модель с фронтальной границей фазовых переходов вследствие того, что за фронтом происходят перегрев гидрата и его диссоциация на газ и воду.



*Рис. 3. Распределение температуры при отборе газа под давлением  $P_e=6$  МПа. Сплошная и штриховая линии соответствуют температуре пласта и равновесной температуре*

### **Выводы**

В работе получены решения, описывающие распределения основных параметров в каждой области пласта. В результате анализа полученных решений установлены основные закономерности разложения газогидратов в пористых пластах в зависимости от давления и температуры. Получены распределения температур при отборе газа под давлением  $P_e=5$  МПа и  $P_e=6$  МПа.

*Работа поддержана грантом СФ БашГУ В15-12.*

### **Список литературы**

1. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. М.: Химия, 1980.
2. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. М.: Недра, 1992.
3. Макогон Ю.Ф. Газовые гидраты, предупреждение их образования и использование, М.: Недра.,1985.
4. 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.

5. Шагапов В. Ш., Хасанов М. К. Мусакаев Н. Г. Образование газогидрата в пористом резервуаре, частично насыщенном водой, при инъекции холодного газа // Прикладная механика и техническая физика. – 2008. – Т. 49, № 3. – С. 137–150.
6. Шагапов В.Ш., Хасанов М.К., Гималтдинов И.К., Столповский М.В. Особенности разложения газовых гидратов в пористых средах при нагнетании теплого газа // Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – Т. 20, № 3. – С. 347–354
7. Шагапов В.Ш., Хасанов М.К., Гималтдинов И.К., Столповский М.В. Численное моделирование образования газогидрата в пористой среде конечной протяженности при продувке газом // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т. 52, № 4. – С. 116–126.

**Рецензенты:**

Гималтдинов И.К., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика и механика» Стерлитамакского филиала ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», г. Стерлитамак;

Биккулова Н.Н., д.ф.-м.н., профессор кафедры «Общая и теоретическая физика» Стерлитамакского филиала ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», г. Стерлитамак.