



ISSN: 2658–5782

Номер 4

Октябрь–Декабрь 2019

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





К теории разработки гидратного пласта тепловым воздействием

Шагапов В.Ш.* , Давлетшина М.Р.**

*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

**Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа

В работе предложена и развита математическая модель процесса разложения газогидрата при тепловом воздействии. На основе предложенной технологической схемы и соответствующей теоретической модели рассмотрена задача о воздействии теплового источника на пористый пласт конечной длины, изначально насыщенном гидратом метана. Задача описывает нагрев и одновременный отбор газа в комбинированную скважину. Согласно принятой схеме в межтрубный канал подается теплоноситель в виде горячей воды, а внутренняя скважина сообщается с пластом, куда поступает газ, образовавшийся в процессе разложения гидрата в результате термического воздействия. Исследовано влияние температуры теплового источника на эволюцию тепловых полей вокруг скважины, на характер движения границы фазового перехода, а также получен закон ее движения. Проанализированы затраты тепла на прогревание пласта и эволюция выхода газа за рассматриваемый интервал времени при различных значениях температуры нагрева, перепада давления. Выявлена динамика массового расхода газа и энергоэффективности добычи метана при различных значениях перепада температур между пластом и нагнетаемой в тепловую трубу жидкостью. Получено квазистационарное решение, которое соответствует случаю, когда в скважине поддерживается давление равное равновесному значению для исходной температуры газогидратного пласта. Проанализирована зависимость энергоэффективности предлагаемого способа добычи газа от пористости пласта. Установлено, что при двукратном увеличении гидратосодержания пласта эта величина растет примерно на десять процентов. Полученные решения позволяют определить наиболее выгодные режимы теплового воздействия. Данные решения хорошо согласуются с численными результатами, полученными по более общей теоретической модели.

Ключевые слова: фильтрация газа, газовый гидрат, фазовый переход, квазистационарное решение, теплоноситель

1. Введение

Исследования по изучению гидратов углеводородных газов является на сегодняшний день особенно важными ввиду истощения традиционных газовых месторождений. Газогидраты представляют большой интерес с точки зрения получения альтернативного источника энергии, а также захоронения углекислого газа (снижения парникового эффекта) и получения чистой пресной воды. По разным оценкам [1, 2] потенциальные запасы отложений гидратов практически неисчерпаемы.

Согласно данным всемирно известного исследования «BP Statistical Review of World Energy 2018» объем мировых традиционных извлекаемых запасов газа составляет 193,5 млн. м³. В то же время объемы газа в гидратах по оценкам «Resources to Reserves 2013» достигают до 2000 млн. м³.

Газовые гидраты представляют собой потенциально обширный источник природного газа, они встречаются в зонах вечной мерзлоты и на глубокководье, что создает сложности для их разработки. Гидраты (клатраты) представляют собой твердые кристаллические соединения низкомолекулярных газов (таких как метан, этан, пропан, бутан и др.) с водой, их образование и разложение зависит от температуры, давления, свойств пористой сре-

ды и т.д. Самым распространенным природным газом–гидратообразователем является метан, содержание которого в гидратах очень высоко: из одного кубометра (в стандартных условиях) можно получить более 160 м³ метана. По содержанию энергии газовые гидраты сопоставимы с битуминозной нефтью и нефтеносными песками [1, 3].

Во многих лабораториях, научных центрах и энергетических компаниях всего мира проводятся исследования, связанные с возможностью освоения данных ресурсов. В 2009 г. на озере Байкал на глубине 1400 метров были обнаружены массивные холмы газогидратов. В общей сложности на озере Байкал открыто 44 месторождения газовых гидратов [1]. В настоящее время выявлено более 230 газогидратных залежей. В 1969 г. На Мессояхском газовом месторождении обнаружена газогидратная залежь. Здесь запасы газа по оценкам специалистов составляют до 30 млрд. м³ [2]. Ресурсы природного газа в газогидратах в России оцениваются до 100–1000 трлн. м³ [1, 2].

Для практической реализации задач необходимо теоретическое обоснование, которое базируется на математическом моделировании и численных методах. Однако подобные исследования достаточно сложны в связи с влиянием множества различных факторов.

Классические подходы к добыче газа из гидратов описываются в работах [4–6], они основаны на термическом и депрессионном методах и использовании ингибиторов. Все три классических подхода нацелены на то, чтобы сместить термодинамические условия в пласте из зоны стабильности гидрата в зону его разложения. Повышение температуры выше равновесной вызывает выделение газа. С увеличением тепловой мощности, подводимой к гидрату, время разложения сокращается. Подобные методы были апробированы в Канаде на скважинах «Mallik» с использованием горячей воды [7]. При этом температура поддерживалась 325 К и за 5 дней извлекалось более 500 м³ газа. Через 40 дней добыча практически прекращалась. Данный метод оказался достаточно энергозатратным. Проводились исследования по закачке теплого газа в гидратосодержащий пласт. Выявлено, что степень разложения гидратов невысокая. При закачке метана с температурой 313 К зона разложения гидратов за 2 месяца не продвинулась далее 5 метров. Данный подход характеризуется невысокой эффективностью для практического применения из-за быстрой потери энергии теплоносителя. Темпы разложения гидрата определяются поступлением тепла к фронтальной поверхности разложения через слой стекающей воды.

На сегодняшний день имеется множество исследований, связанных с изучением процессов образования и разложения газовых гидратов в пористых средах. Это вызвано необходимостью развития теоретических основ указанных процессов и создания технологий разработки газогидратных залежей.

Одними из первых исследований, связанных с описанием особенностей разложения газовых гидратов в пористом пласте, являются работы Черского Н.В., Бондарева Э.А. [4] и Веригина Н.Н., Хабибуллина И.Л. [5].

В исследовании Yin Z. et al. [8] описано численное моделирование процесса разложения гидрата метана в пористой среде в реакторе при тепловом воздействии через его стенки. Общая добыча газа оценивалась согласно трем экспериментам с различными граничными температурами. Было получено хорошее согласование с численными результатами.

Работы Цыпкина Г.Г. [6, 9, 10] посвящены изучению процесса разложения газовых гидратов в пористом пласте, математическому моделированию процессов, протекающих в грунтах, геотермальных системах при их освоении и в месторождениях природного газа.

В работе Grover T. et al. [11] построена математическая модель, описывающая процесс добычи газа из газогидратного пласта. Основные геологические и физические параметры (давление, температура и размеры месторождения) приняты на основе известных данных по Мессояхскому месторождению. Гидратная залежь эксплуатировалась около 8 лет (при постоянном отборе газа), а затем была законсервирована на 3 года. В исходном состоянии температуры в гидратном пласте, газовой подложке и окружающих горных породах различались, но в течение последующих 6 лет они выравнивались. Показано, что поступающее тепло из окружающих пород тратится на разложение газогидрата. Отбор газа из залежи происходил до тех пор, пока давление в пласте не упало до значения порядка 2.5 МПа. Выявлено, что последующая разработка месторождения, сопровождаемая его консервацией, приводит к дальнейшему разложению гидрата и повышению давления в пласте.

Для разработки газогидратных залежей предложено воздействие электромагнитных волн на залежи газогидратов, что является частным случаем метода нагрева [12, 13]. Особенности воздействия высокочастотного электромагнитного излучения на газогидратный пористый пласт описаны в работе Сыртланова В.Р., Шагапова В.Ш. [14].

В работах Шагапова В.Ш. и др. [15, 16] пред-

ложены принципиальные технологические схемы и построены математические модели возможной добычи газа из гидратного массива путем закачки теплой воды. Изучено влияние различных режимов воздействия теплоносителем на интенсивность выхода газа. Моделированию фазовых превращений газогидратных включений в пористых средах посвящены работы [17, 18]. Предложена и исследована математическая модель диссоциации газовых гидратов в пористой среде, основанная на расщеплении по физическим процессам. Таким образом, задачи, связанные с разработкой газогидратных залежей и добычей газа из газогидрата, достаточно перспективны. На сегодняшний день актуальным является вопрос о повышении энергетической эффективности и минимизации экономических и энергетических издержек. Эффективность рассматривается с точки зрения теплотворной способности газа (метана) и определяется процентом извлечения метана и скоростью извлечения. Эффективность здесь характеризуется соотношением энергозатрат на извлечение и полученное количество теплоты после сгорания метана.

Целью данного исследования является построение математической модели, описывающей процесс разложения гидратного пласта конечной протяженности при тепловом воздействии. Полученные решения позволят анализировать различные режимы теплового воздействия с точки зрения энергоэффективности добычи метана и целесообразности освоения таких залежей.

2. Постановка задачи и основные уравнения

Рассмотрим пористый пласт ($r_w \leq r \leq R$), насыщенный в исходном состоянии гидратом метана, давление и температура которого равны соответственно p_0 и T_0 , а в центре пробурена скважина радиуса r_w . Условия стабильного существования гетерогенной смеси газа и его гидрата выражаются условием фазового равновесия, которое в небольших диапазонах значений давления и температуры имеет вид [19, 20]:

$$T_s = T_{h0} + T_* \ln \left(\frac{p}{p_{s0}} \right).$$

Здесь T_s и T_{h0} — равновесные значения температур, соответствующие давлениям p и p_{s0} ; T_* — эмпирический параметр, зависящий от вида газогидратообразователя. В частности, для гидрата метана $T_{h0} = 280$ К, $T_* = 10$ К, $p_{s0} = 5,5$ МПа. Таким образом, исходные параметры системы удовлетворяют условию $T_0 < T_s(p_0)$.

Пусть через скважину закачивается горячая вода (теплоноситель) с температурой T , причем $T_e > T_s(p_0)$. С учетом того, что давление в рассматриваемой системе, согласно постановке задачи, остается постоянным и равным исходному значению p_0 , в результате теплового воздействия в пласте образуются две области: ближняя, насыщенная продуктами разложения гидрата (газом и водой) и дальняя, содержащая в своем составе гидрат. При этом возникает подвижная граница фазового перехода r_s , движущаяся вглубь пласта и на которой происходит процесс разложения газогидрата. Технологическая схема представлена на рис. 1.

Для описания процессов тепломассопереноса, сопровождающихся разложением газогидрата будем использовать однотемпературную модель. Примем пористость постоянной величиной; скелет пористой среды, гидрат и вода являются несжимаемыми и неподвижными [19, 20]:

$$m, \rho_{sk}, \rho_h, \rho_w = \text{const}; \quad v_{sk} = v_h = v_w = 0.$$

Здесь m — пористость; ρ, v — соответственно истинная плотность и скорость j -ой фазы ($j = g, sk, h, w$). Нижние индексы sk, h, w и g соответствуют параметрам скелета, гидрата, воды и газа. Гидрат считаем двухкомпонентной системой с массовой концентрацией газа G .

Система основных уравнений, представляющая собой уравнения неразрывности и притока тепла для области, содержащей метан и воду ($r_w \leq r \leq r_s$), имеет вид [8, 20, 21]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(S_g m \rho_g) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r S_g m \rho_g v_g) = 0, \quad (1)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_g c_g m S_g v_g \frac{\partial T}{\partial r} = \lambda \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (2)$$

Здесь r — радиальная координата; t — время; p_g, c_g, v_g, S_g — соответственно плотность, теплоемкость, скорость и насыщенность для газовой фазы. Величины удельной объемной теплоемкости ρc и коэффициента теплопроводности λ будем считать постоянными, поскольку они определяются, в основном, параметрами скелета пористой среды.

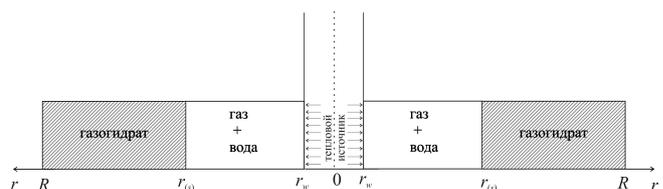


Рис. 1. Технологическая схема

В качестве уравнения состояния используется уравнение калорически совершенного газа [21]:

$$\rho_g = \frac{p}{R_g T},$$

где R_g — приведенная газовая постоянная. Поскольку перепады температур ΔT в области фильтрации газа обычно малы по сравнению с исходной температурой системы T_0 ($\Delta T \ll T_0$), для величины плотности можно записать:

$$\rho_g = \frac{p_0}{R_g(T_0 + \Delta T)} \approx \frac{p_0}{R_g T_0} \left(1 - \frac{\Delta T}{T_0}\right) \approx \frac{p_0}{R_g T_0} = \rho_g^0, \quad (3)$$

где ρ_g^0 — исходная плотность газа.

Температуру в области, насыщенной гидратом ($r_s \leq r \leq R$), будем считать постоянной и равной исходной температуре T_0 в течение всего процесса, то есть:

$$(r_s \leq r \leq R) : T = T_0 (t \geq 0). \quad (4)$$

Кроме того, представленные уравнения необходимо дополнить соотношениями, следующими из условий баланса масс и тепла на границе фазового перехода [20, 21]:

$$\begin{aligned} m\rho_h(1-G)(0-\dot{r}_s) &= mS_w\rho_w(0-\dot{r}_s), \\ m\rho_h G(0-\dot{r}_s) &= mS_g\rho_g^0(v_{g(s)}-\dot{r}_s), \\ \lambda \frac{\partial T(1)}{\partial r} &= -m\rho_h l_h \dot{r}_s. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь \dot{r}_s — скорость движения границы фазового перехода; l_h — удельная теплота гидратообразования; ρ_h и ρ_w — соответственно плотности гидрата и воды; S_w — насыщенность пор водой. Нижний индекс 1 относится к параметрам ближней, насыщенной метаном и водой, области. Из первого уравнения системы (5) для величин газо- и водонасыщенности можно записать [20]:

$$S_w = \frac{\rho_h(1-G)}{\rho_w}, \quad S_g = 1 - \frac{\rho_h(1-G)}{\rho_w}.$$

Величина скорости газа на границе фазового перехода определяется из второго уравнения системы (5) [20, 21]

$$v_{g(s)} = \left(1 - \frac{\rho_h G}{S_g \rho_g^0}\right) \dot{r}_s. \quad (6)$$

Температуру на этой границе будем считать непрерывной и равной T_0 в соответствии с (4). Начальные и граничные условия для определения поля

температур в ближней области имеют вид:

$$\begin{aligned} t = 0 : T &= T_0 (r_c \leq r \leq R_k), \\ r = r_c : T &= T_1 (t > 0). \end{aligned} \quad (7)$$

Другим граничным условием для данной области является, очевидно, условие (4). Поскольку, согласно постановке задачи, давление системы не изменяется и равно исходному значению p_0 , из уравнения неразрывности (1) с учетом (3) можно получить выражение для скорости фильтрации газа через любое сечение, определяемое координатой r :

$$v_g(r) = \frac{r_s}{r} v_{g(s)}. \quad (8)$$

Система уравнений (2)–(8) является замкнутой. Для ее решения используется метод ловли фронта в узел пространственной сетки [17], заключающийся в том, что за неизвестный и определяемый в ходе решения задачи временной отрезок фронт фазового перехода перемещается по координатной сетке ровно на один шаг.

3. Квазистационарное решение

Рассмотрим случай, когда в скважине поддерживается давление, равное равновесному значению для исходной температуры пласта ($p_e = p_s(T_0)$). Тогда, пренебрегая в уравнении (2) первым слагаемым в левой части (т.е. полагая $\partial T / \partial t = 0$), можем получить:

$$\begin{aligned} r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} &= \left(\frac{v_s r_s}{\chi} - 1\right) \frac{\partial T}{\partial r} \quad (r_c < r < r_s), \\ v &= v_s \frac{r_s}{r}, \quad \chi = \frac{\lambda}{\rho_g c_g m S_g}. \end{aligned} \quad (9)$$

С учетом граничных условий

$$\begin{aligned} T &= T_w, \quad r = r_w, \quad T = T_0, \quad r = r_s, \\ -\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r_s} &= m\rho_h l_h \dot{r}_s \end{aligned} \quad (10)$$

решение уравнения (9) имеет вид:

$$\begin{aligned} T - T_w &= \frac{C_1}{\alpha + 1} \left(\frac{r}{r_s}\right)^\alpha r + C_2, \\ \alpha &= \frac{v_s r_s}{\chi} - 1. \end{aligned} \quad (11)$$

где C_1, C_2 — константы. С учетом первого граничного условия из (10) получим дифференциальное уравнение для определения закона перемещения

фронта разложения гидрата:

$$\left(\frac{r_s}{r_w}\right)^{\alpha+1} = \frac{A+1}{A},$$

$$A = \frac{\chi \rho_g m l_h}{\lambda (T_w - T_0) \left(1 - \frac{\rho_h G}{S_g \rho_g^0}\right)}. \quad (12)$$

Это уравнение можно представить в виде:

$$r_s \dot{r}_s = \frac{(\alpha+1)\chi}{1 - \frac{\rho_h G}{S_g \rho_g^0}}. \quad (13)$$

Методом разделения переменных, принимая начальные условия как $r_s = r_w$ при $t = 0$, решение (13) запишется в неявном виде:

$$r_s^2 \ln(r_s/r_w) - (r_s^2 - r_w^2)/2 = 2\beta t,$$

$$\beta = \alpha \frac{\ln((A-1)/A)}{mc(\rho_h G - S_g \rho_g^0)}.$$

Отсюда для начальной стадии, когда $(r_s - r_w \ll r_w)$, имеем следующее приближенное решение

$$r_s - r_w = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\beta t}. \quad (14)$$

Уравнение (12) при определении численным интегрированием закона движения границы фазовых переходов при начальном условии $r_s = r_w (t = 0)$ имеет особенность – согласно уравнению (13) $\dot{r}_s = \infty$ при $t = 0$. Для того, чтобы выйти из этой особенности, зададим для исходного положения фронта фазового перехода бесконечно малое приращение. Таким образом найдем приближенное решение (14). Решение может быть получено методом Рунге–Кутты 4 порядка. Для потока тепла от скважины, отнесенного на единицу ее длины [21], можем записать выражение:

$$q^{(T)} = -2\pi r_w \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r_w}. \quad (15)$$

Для дебита массы газа на единицу длины скважины, определяемого согласно [20, 21], получим:

$$q^{(m)} = -2\pi r_w \rho_g S_g m v_w,$$

с учетом (4) имеем

$$q^{(m)} = 2\pi \rho_g S_g m \chi r_s \dot{r}_s. \quad (16)$$

Используя (11) и (16) для дебита скважины, окончательно будем иметь:

$$q^{(m)} = 2\pi \rho_g S_g m v^T \ln(A) \ln^{-1}(r_s/r_w).$$

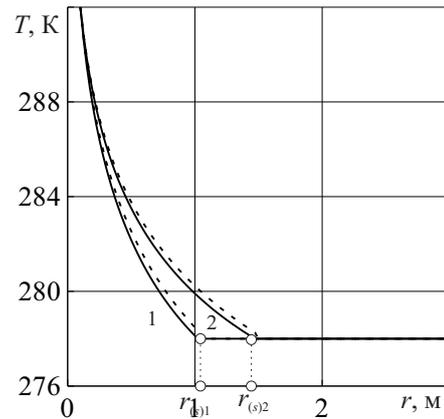


Рис. 2. Распределение температуры в пласте в моменты времени: 1 – $t = 20$ сут., 2 – $t = 50$ сут. Численное (сплошная линия) и квазистационарное (штриховая линия) решения

Можно ввести параметр $k = q^{(m)}/q^{(T)}$, определяющий массовый дебит газа, отнесенный на единицу затраченного тепла, что определяет энергоэффективность добычи гидрата. Используя (11) и (15) для k можно получить следующее выражение:

$$k = \frac{\rho_g S_g \chi}{\rho_h l_h} = \frac{G}{l_h} \left(1 - \frac{\rho_g S_g}{\rho_h G}\right) \approx \frac{G}{l_h}.$$

4. Результаты численных расчетов

Для параметров, характеризующих состояние системы газ–вода–гидрат приняты следующие значения: $m = 0,2$, $G = 0,12$, $\rho_h = 900 \text{ кг/м}^3$, $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$, $R_g = 520 \text{ Дж/(К·кг)}$, $\lambda = 2 \text{ Вт/(м·К)}$, $c_g = 2600 \text{ Дж/(К·кг)}$, $p_e = 2,5 \text{ МПа}$, $p_0 = 6 \text{ МПа}$, $T_0 = 278 \text{ К}$, $T_w = 292 \text{ К}$, $l_h = 5 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$ [20]. Радиус скважины $r_w = 0,1 \text{ м}$.

На рис. 2 представлено распределение температуры пласта в различные моменты времени. Из рисунка видно, что убывание температуры пласта в области, насыщенной метаном и водой, имеет немонотонный характер. При этом с течением времени тепло, полученное от скважины, в большей части идет на прогрев прифронтной области. Как видим из рис. 2 и 3, графики численного и квазистационарного решений хорошо согласуются для малых времен.

На рис. 3(а) иллюстрируется закон движения координаты фронта фазового перехода. Видно, что с течением времени скорость перемещения фронта разложения снижается. Это связано с тем, что разложение гидрата происходит за счет кондуктивного потока тепла через область между внешней стенкой скважины и фронтом разложения от сква-

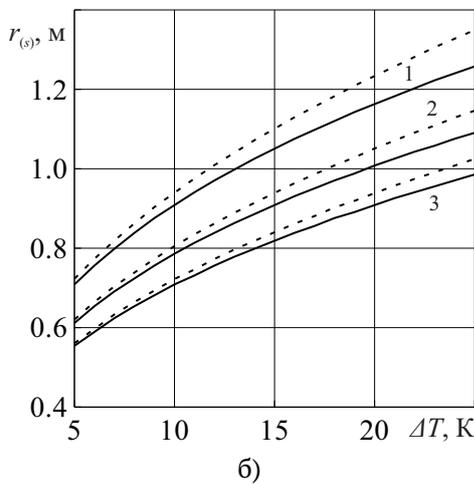
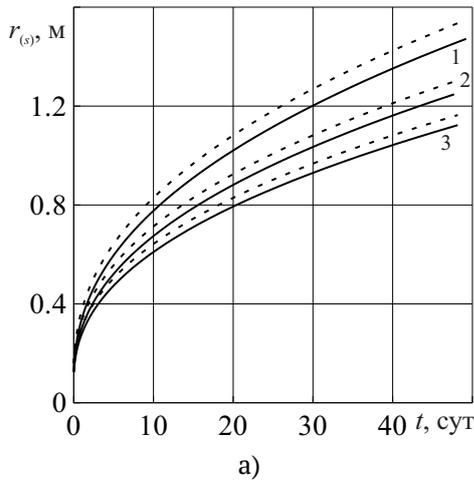


Рис. 3. Зависимость координаты границы фазового перехода от времени (а) и перепада температуры (б) для момента времени $t = 20$ сут. при значениях пористости: 1 – $m = 0,1$, 2 – $m = 0,15$, 3 – $m = 0,2$. Численное (сплошная линия) и квазистационарное (штриховая линия) решения

жины при постоянном изменении температуры $\Delta T = T_w - T_0$. Поскольку со временем эта область расширяется, происходит увеличение ее теплового сопротивления, что, в свою очередь, приводит к снижению теплового сопротивления. При этом, как следует из рис. 3(б), с ростом перепада температуры (ΔT) координата фронтальной границы для одного и того же промежутка времени увеличивается. Здесь отметим, что пунктирные кривые, полученные по квазистационарному решению, расположены выше, чем стационарные кривые. Это связано с тем, что квазистационарное решение не учитывает затраты тепла на нагрев пласта в ближней зоне. Следует отметить также, что с увеличением пористости пласта происходит снижение пере-

мещения зоны разложения. Это объясняется тем, что с ростом содержания продуктов разложения газогидрата в пласте происходит увеличение расхода энергии для их нагрева.

Массовый приток газа, отнесенный на единицу длины скважины, определим из соотношения:

$$m_g = 2\pi r m S_g v_g \rho_g = \\ = 2\pi \rho_g r_s m \left(1 - \frac{\rho_h (1 - G)}{\rho_w} \right) \left(1 - \frac{\rho_g G}{S_g \rho_g^0} \right) \dot{r}_s.$$

На основе выражения (5) количество теплоты, выделяющееся при сгорании данного количества метана, равно:

$$q^{(m)} = m_g l = 2\pi \rho_g r_s m \times \\ \times \left(1 - \frac{\rho_h (1 - G)}{\rho_w} \right) \left(1 - \frac{\rho_g G}{S_g \rho_g^0} \right) \dot{r}_s l,$$

где $l = 50$ МДж/кг – теплотворная способность метана.

На рис. 4 представлены динамика массового расхода газа и его зависимость от перепада температур при различной пористости пласта. Как видно из рис. 4(а) с течением времени массовый расход газа уменьшается. Это связано с тем, что дебит газа лимитируется интенсивностью диссоциации гидрата, которая снижается с течением времени, и, соответственно, с ростом затрат тепла на прогрев все больших областей пласта. Аналогичным образом объясняется и тот факт, что с увеличением перепада температур массовый расход увеличивается (рис. 4(б)). При этом с течением времени увеличение пористости пласта практически не сказывается на величине массового расхода газа, поскольку скорость движения газа убывает с расстоянием от центра скважины.

Количество тепла, затраченного на разложение метана, найдем исходя из соотношения:

$$q^{(T)} = 2\pi r_w \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) \Big|_{r=r_w}.$$

Тогда энергоэффективность добычи гидрата определится соотношением:

$$k = q^{(m)} / q^{(T)}.$$

На рис. 5 представлена зависимость энергоэффективности добычи метана в зависимости от времени и перепада температур. Из рис. 5(а) видно, что с течением времени энергоэффективность пласта увеличивается. Это объясняется тем, что с течением времени на прогрев прискважинной области требуется все меньшее количество тепла, т.к.

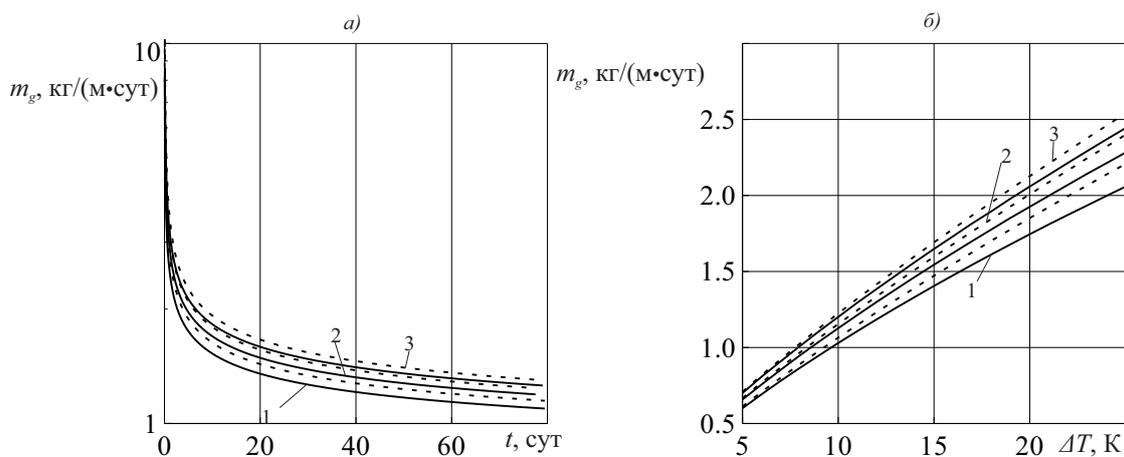


Рис. 4. Зависимость массового расхода от времени (а) и перепада температур (б) для момента времени $t = 20$ сут. для значений пористости: 1 – $m = 0,1$, 2 – $m = 0,15$, 3 – $m = 0,2$

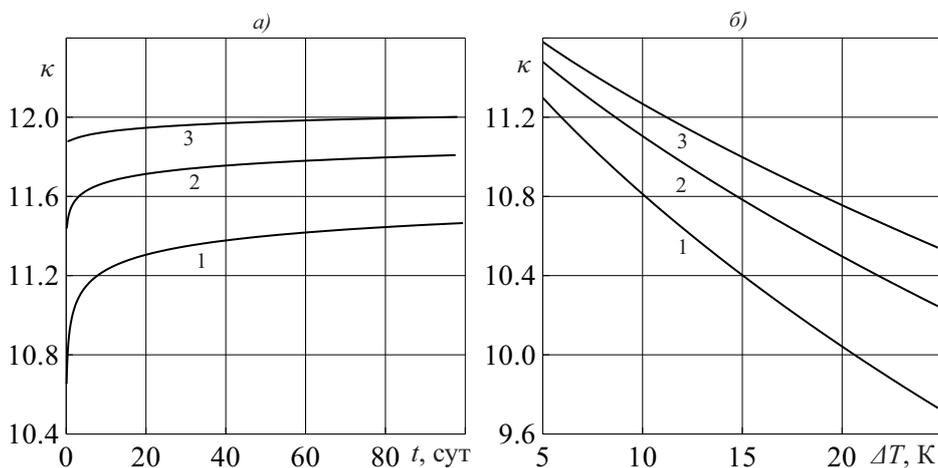


Рис. 5. Зависимость массового расхода от времени (а) и перепада температур (б) для момента времени $t = 20$ сут. для значений пористости: 1 – $m = 0,1$; 2 – $m = 0,15$; 3 – $m = 0,2$

основная его часть идет на прогрев прифронтной области. При этом увеличение пористости пласта также способствует увеличению его энергоэффективности, поскольку в этом случае увеличивается содержание газа в пласте. Как следует из рис. 5(б), рост перепада температур приводит к снижению энергоэффективности, т.к. большая часть тепла расходуется на прогрев гидратного пласта.

5. Заключение

Решена задача о возможности разложения газогидратного пласта при тепловом воздействии. Для радиальной задачи с фронтальной границей фазовых переходов построены решения, описывающие поля температур, а также динамику движения границы разложения гидрата и массового расхода газа. Изучено влияние перепада температур

между пластом и нагнетаемой водой на эволюцию фронта разложения гидрата и на величину энергоэффективности разложения гидрата метана при различной пористости пласта. Предложенная схема расчетов и полученные на ее основе результаты позволяют анализировать эффективность разработки гидратного пласта за счет прогрева рабочей зоны месторождения. Предложенная теоретическая модель позволяет произвести количественную оценку отбора метана при изменении температуры нагрева и перепада давления, а также определить наиболее выгодные режимы с точки зрения энергоэффективности.

Авторы благодарят А.С. Чиглинцеву и М.В. Столповского за оказание помощи в проведении численных расчетов.

Список литературы

- [1] Макогон Ю.Ф. Газогидраты. История изучения и перспективы освоения // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2010. № 2. С. 5–21.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=15122639>
- [2] 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>
- [3] Nair V.C., Gupta P., Sangwai J.S. Gas Hydrates as a Potential Energy Resource for Energy Sustainability // Sustainable Energy Technology and Policies. 2018. V. 1. Pp. 265–287.
DOI: 10.1007/978-981-10-7188-1_12
- [4] Черский Н.В., Бондарев Э.А. О тепловом методе разработки газогидратных месторождений // Докл. АН СССР. 1972. Т. 203, № 3. С. 550–552.
<http://mi.mathnet.ru/rus/dan/v203/i3/p550>
- [5] Веригин Н.Н., Хабибуллин И.Л., Халиков Г.А. Линейная задача о разложении гидратов газа в пористой среде // Изв. АН СССР. МЖГ. 1980. № 1. С. 174–177.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=28143009>
- [6] Цыпкин Г.Г. Влияние разложения газового гидрата на добычу газа из пласта, содержащего гидрат и газ в свободном состоянии // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2005. № 1. С. 132–142.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=9144053>
- [7] Nakai S. Development of Natural Gas Hydrate (NGH) Supply Chain // Proceedings, 25th World Gas Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 4–8 June, 2012. Pp. 3040–3050.
- [8] Yin Z., Moridis G., Chong Z., Tan H., Linga P. Numerical analysis of experiments on thermally-induced dissociation of methane hydrates in porous media // Ind. Eng. Chem. Res. 2018. 57(17). Pp. 5776–5791.
DOI: 10.1021/acs.iecr.7b03256
- [9] Цыпкин Г.Г. Течения с фазовыми переходами в пористых средах. М.: Физматлит, 2009. 232 с.
- [10] Цыпкин Г.Г. Аналитическое решение нелинейной задачи разложения газового гидрата в пласте // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2007. № 5. С. 133–142.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=9585514>
- [11] Grover T., Moridis G., Holditch S. Analysis of reservoir performance of Messoyakha gas hydrate field // Proceedings of the eighteenth international offshore and polar engineering. Vancouver, Canada, 2008. Pp. 49–56.
- [12] Низаева И.Г., Макогон Ю.Ф. Воздействие электромагнитных полей на нетрадиционные виды углеводородного сырья // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2013. № 3. С. 42–54.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=20516491>
- [13] Хабибуллин И.Л., Насыров Н.М. Математическое моделирование диссоциации газовых гидратов в переменном электромагнитном поле // Фильтрация многофазных систем. ИТПМ СО АН СССР. 1991. С. 91–95.
- [14] Сыртланов В.Р., Шагапов В.Ш. Фронтальная задача о разложении газовых гидратов в пористой среде при высокочастотном электромагнитном излучении // Инженерно-физический журнал. 1998. Т. 71, № 2. С. 263–267.
<http://www.itmo.by/jepeter/711998r/710263.html>
- [15] Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Сыртланов В.Р. О возможности вымывания газа из газогидратного массива посредством циркуляции теплой воды // Прикладная механика и техническая физика. 2009. Т. 50, № 4. С. 100–111.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=12846453>
- [16] Рагимли П.И., Повещенко Ю.А., Рагимли О.Р. и др. Использование расщепления по физическим процессам для моделирования диссоциации газовых гидратов // Математическое моделирование. 2017. Т. 29, № 7. С. 133–144.
<http://mi.mathnet.ru/rus/mm/v29/i7/p133>
- [17] Рагимли П.И., Повещенко Ю.А., Подрыга В.О. и др. Задачи совместной фильтрации в талой зоне и пьезопроводной среде с газогидратными включениями // Математическое моделирование. 2018. Т. 30, № 6. С. 95–116.
<http://mi.mathnet.ru/rus/mm/v30/i6/p95>
- [18] Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С. О нагнетании гидратообразующего газа в снежный массив, насыщенный тем же газом, при переходе через точку плавления льда // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 1. С. 89–104.
https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=172742&ARTICLE_ID=172750
- [19] Шагапов В.Ш., Мусакаев Н.Г. Динамика образования и разложения гидратов в системах добычи, транспортировки и хранения газа. М.: Наука, 2016. 238 с.
- [20] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.; Ч. 2. 360 с.
- [21] Чиглинцева А.С., Шагапов В.Ш. О нагнетании гидратообразующего газа в пласт снега, насыщенный тем же газом // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН. 2017. Т. 12, № 2. С. 219–226.
DOI: 10.21662/uim2017.2.033



On the theory of hydrate formation decomposition under thermal influence

Shagapov V.Sh. *, Davletshina M.R. **

*Mavlyutov Institute of Mechanics UFRC RAS, Ufa

**Ufa State Petroleum Technological University, Ufa

A mathematical model of the process of decomposition of gas hydrate during heat exposure is proposed and developed. Based on the proposed technological scheme and the corresponding theoretical model, the problem of the action of a heat source on a porous layer of finite length, initially saturated with methane hydrate, is considered. The task describes the heating and simultaneous extraction of gas into a combined well. According to the adopted scheme, a coolant in the form of hot water is supplied to the annular channel, and the internal well communicates with the formation and gas is produced there, which was formed during the hydrate decomposition as a result of thermal exposure. The influence of the temperature of the heat source on the evolution of thermal fields around the well, on the nature of the motion of the phase transition boundary, is studied, and the law of its motion is obtained. The heat consumption for heating the formation and the evolution of gas output over the considered time interval at various values of the heating temperature and pressure drop are analyzed. The dynamics of the gas mass flow rate and the energy efficiency of methane production at various values of the temperature difference between the reservoir and the fluid injected into the heat pipe are revealed. A quasistationary solution is obtained that corresponds to the case when a pressure is maintained in the well equal to the equilibrium value for the initial temperature of the gas hydrate formation. The dependence of the energy efficiency of the proposed method of gas production on the porosity of the formation is analyzed. It was established that with a twofold increase in the hydrate content of the formation, this value grows by about ten percent. The obtained solutions make it possible to determine the most favorable heat exposure regimes. Moreover, this solution is in good agreement with the numerical results obtained by a more general theoretical model.

Keywords: gas filtration, gas hydrate, phase transition, quasi-stationary solution, heat-transfer

References

- [1] Makogon YU.F. Gazogidraty. Istoriya izucheniya i perspektivy osvoyeniya // Geologiya i poleznye iskopayemye Mirovogo okeana. 2010. No. 2. Pp. 5–21.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=15122639>
- [2] Makogon YU.F., Omel'chenko R.YU. Messoyakha – gazogidratnaya zalez', rol' i znachenije // Geologiya i poleznye iskopayemye Mirovogo okeana. 2012. No. 3. Pp. 5–19.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=17960118>
- [3] Nair V.C., Gupta P., Sangwai J.S. Gas Hydrates as a Potential Energy Resource for Energy Sustainability // Sustainable Energy Technology and Policies. 2018. Vol. 1. Pp. 265–287.
DOI: 10.1007/978-981-10-7188-1_12
- [4] Cherskiy N.V., Bondarev E.A. O teplovom metode razrabotki gazogidratnykh mestorozhdeniy // Dokl. AN SSSR. 1972. V. 203, No. 3. Pp. 550–552.
<http://mi.mathnet.ru/rus/dan/v203/i3/p550>
- [5] Verigin N.N., Khabibullin I.L., Khalikov G.A. Lineynaya zadacha o razlozhenii gidratov gaza v poristoy srede // Izv. AN SSSR. MZHG. 1980. No. 1. Pp. 174–177.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=28143009>
- [6] Tsyarkin G.G. Effect of decomposition of a gas hydrate on the gas recovery from a reservoir containing hydrate and gas in the free state // Fluid Dynamics. 2005. No. 1. Pp. 117–125.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=14317668>
- [7] Nakai S. Development of Natural Gas Hydrate (NGH) Supply Chain // Proceedings, 25th World Gas Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 4-8 June, 2012. Pp. 3040–3050.
- [8] Yin Z., Moridis G., Chong Z., Tan H., Linga P. Numerical analysis of experiments on thermally-induced dissociation of methane hydrates in porous media // Ind. Eng. Chem. Res. 2018. 57(17). Pp. 5776–5791.
DOI: 10.1021/acs.iecr.7b03256
- [9] Tsyarkin G.G. Tcheniya s fazovymi perekhodami v poristyykh sredakh. M.: Fizmatlit, 2009. 232 p.

- [10] Tsyppin G.G. Analytical solution of the nonlinear problem of gas hydrate dissociation in a formation // *Fluid Dynamics*. 2007. V. 42, No. 5. Pp. 798–806.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=14155488>
- [11] Grover T., Moridis G., Holditch S. Analysis of reservoir performance of Messoyakha gas hydrate field // *Proceedings of the eighteenth international offshore and polar engineering*. Vancouver, Canada, 2008. Pp. 49–56.
- [12] Nizayeva I.G., Makogon YU.F. Vozdeystviye elektromagnitnykh poley na netraditsionnyye vidy uglevodorodnogo syr'ya // *Geologiya i poleznyye iskopayemye Mirovogo okeana*. 2013. No. 3. Pp. 42–54.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=20516491>
- [13] Khabibullin I.L., Nasyrov N.M. Matematicheskoye modelirovaniye dissotsiatsii gazovykh gidratov v peremennom elektromagnitnom pole // *Fil'tratsiya mnogofaznykh sistem*. ITPM SO AN SSSR. Novosibirsk: 1991. Pp. 91–95.
- [14] Syrtlanov V.R., Shagapov V.SH. Frontovaya zadacha o razlozhenii gazovykh gidratov v poristoy srede pri vysokochastotnom elektromagnitnom izluchenii // *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 1998. V. 71, No. 2. Pp. 263–267.
<http://www.itmo.by/jepter/711998r/710263.html>
- [15] 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. T. 50, No. 4. Pp. 628–637.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13602113>
- [16] Rahimly P.I., Poveshchenko Y.A., Rahimly O.R. et al. The Use of Splitting with Respect to Physical Processes for Modeling the Dissociation of Gas Hydrates // *Math Models Comput Simul*. 2018. V. 10. Pp. 69–78.
DOI: 10.1134/S2070048218010118
- [17] Rahimly P.I., Poveshchenko YU.A., Podryga V.O. et al. Zadachi sovместnoy fil'tratsii v taloy zone i p'yezoprovodnoy srede s gazogidratnymi vklucheniymi // *Matematicheskoye modelirovaniye*. 2018. V. 30, No. 6. Pp. 95–116.
<http://mi.mathnet.ru/rus/mm/v30/i6/p95>
- [18] Shagapov V.SH., Chiglintseva A.S. On injection of hydrate-forming gas into a gas-saturated snowy agglomerate while transition through the ice melting point // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2018. V. 25, No. 1. Pp. 85–99.
DOI: 10.1134/S0869864318010080
- [19] Shagapov V.SH., Musakayev N.G. Dinamika obrazovaniya i razlozheniya gidratov v sistemakh dobychi, transportirovki i khraneniya gaza. M.: Nauka, 2016. 238 p.
- [20] Nigmatulin R.I. Dinamika mnogofaznykh sred. M.: Nauka, 1987. P. 1. 464 p.; P. 2. 360 p.
- [21] Chiglintseva A.S., Shagapov V.SH. O nagnetanii gidratoo-brazuyushchego gaza v snezhnyy massiv, nasyshchennyy tem zhe gazom // *Trudy Instituta mekhaniki im. R.R. Mavlyutova UNTS RAN*. 2017. V. 12, No. 2. Pp. 219–226.
DOI: 10.21662/uim2017.2.033