

УДК 669.162.263.222:519.63

К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ ГИДРАТНОГО ПЛАСТА ТЕПЛОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

© 2022 г. В. Ш. Шагапов¹, М. Р. Давлетшина², *¹Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского федерального
исследовательского центра РАН, г. Уфа, Россия²Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия

*E-mail: davletshina@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.06.2020 г.

После доработки 22.01.2021 г.

Принята к публикации 19.05.2021 г.

В статье предложены технологическая схема, а также соответствующая теоретическая модель процесса добычи природного газа из пласта, полностью насыщенного гидратом, при тепловом воздействии. Согласно принятой схеме, добывающая скважина представляет собой систему из соосных цилиндрических труб. Причем в межтрубном канале течет жидкий теплоноситель, например теплая вода. Внутренний трубчатый канал сообщается с пластом, куда поступает газ, образующийся при разложении гидрата. При составлении теоретической модели принято, что разложение гидрата происходит на фронтальной границе и образовавшаяся при разложении гидрата вода неподвижна. Кроме того, гидравлическим сопротивлением системы “скелет гидрата–вода” пренебрегается, т.е. давление между внешней границей скважины и фронтом разложения однородное. Рассмотрен режим функционирования скважины, когда во внутреннем канале поддерживается давление $P_{(w)}$, равное равновесному значению для фазовых процессов гидрата при исходном значении температуры $T_0(P_{(w)} = P_s(T_0))$. Изучено влияние температуры теплоносителя, гидратонасыщенности пласта на эволюцию тепловых полей, а также на закон распространения фронтальной границы термического разложения гидрата. Проведен анализ энергоэффективности предлагаемого способа добычи газа из гидратного пласта.

DOI: 10.31857/S0040364422010021

ВВЕДЕНИЕ

Исследования всевозможных способов добычи природного газа из гидратных пластов являются на сегодняшний день особенно важными ввиду истощения традиционных месторождений углеводородного сырья. Газогидраты представляют большой интерес как в качестве альтернативного источника энергии, так и способа захоронения углекислого газа (снижения парникового эффекта) и получения чистой пресной воды.

По разным оценкам, потенциальные запасы отложений гидратов практически неисчерпаемы [1, 2]. Согласно данным всемирно известного исследования BP Statistical Review of World Energy 2018¹, объем мировых традиционных извлекаемых запасов газа составляет 193.5 млн м³. В то же время объемы газа в гидратах, по оценкам Resources to Reserves 2013², достигают 2000 млн м³.

¹ <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>

² <https://iea.blob.core.windows.net/assets/afc6bec5-22e8-4105-a1b3-ceb89eae1e9/Reserves2013.pdf>

Газовые гидраты представляют собой потенциально обширный источник природного газа, они встречаются в зонах вечной мерзлоты и на глубоководье, что создает сложности для их разработки. Газовые гидраты – это твердые, похожие на лед вещества, образующиеся в условиях низких температур при повышенном давлении. Они являются клатратными соединениями низкомолекулярных газов, таких как метан, этан, пропан и др., с водой. Самым распространенным природным газом-гидратообразователем является метан. Содержание метана в гидратах очень высоко: из 1 м³ (в стандартных условиях) можно получить более 160 м³ метана. По содержанию энергии (теплотворной способности) газовые гидраты сопоставимы с битуминозной нефтью и нефтеносными песками. Во многих лабораториях, научных центрах и энергетических компаниях всего мира проводятся исследования, связанные с возможностью освоения данных ресурсов. Впервые в 1969 г. на Мессояхском газовом месторождении была обнаружена газогидратная залежь. Здесь запасы газа, по оценкам специалистов, составляют до 30 млрд м³ [2]. В 2009 г. на озере Байкал на глубине 1400 м были об-

наружены массивные холмы газогидратов. В общей сложности на Байкале открыто 44 месторождения газовых гидратов [1]. В настоящее время выявлено более 230 газогидратных залежей. Ресурсы природного газа в газогидратах в России оцениваются в 100–1000 трлн. м³ [2, 3]. Поскольку в арктических широтах нашей страны имеются условия для образования газогидратов [4], изучение вопросов, связанных с гидратами, особенно актуально для России. Требуют детальной изучения вопросы, связанные с разработкой соответствующих технологий по добыче углеводородов из гидратных залежей, проблемы образования гидрата в магистральных газопроводах и анализ и предотвращение возможных экологических катастроф, связанных с гидратами.

Прежде всего необходимо теоретическое обоснование указанных процессов на основе математического моделирования и численных методов. На сегодняшний день имеется множество исследований, связанных с изучением процессов образования и разложения газовых гидратов в пористых средах. Разложение газогидрата может быть обусловлено повышением температуры, снижением давления, закачкой ингибиторов, воздействием высокочастотным электромагнитным излучением и другими механизмами. Классические подходы к добыче газа из гидратов, основанные на термическом и депрессионном методах использования ингибиторов, описываются в работах [5–7].

Здесь отметим, что один только депрессионный способ добычи газа из гидратных пластов малоэффективен. Дело в том, что разложение гидрата на воду и газ происходит с потреблением тепла. При депрессионном воздействии на гидратный пласт тепло, необходимое для разложения гидрата, система берет “из самой себя”, снижая температуру. Оказывается, такой запас тепла совершенно недостаточен для полного разложения всего запаса гидрата, находящегося в порах пласта. При пористости пласта $m = 0.1$, например, при снижении температуры на $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ из единичного объема пласта забирается тепло $q^p = \rho c \Delta T$ (ρ – плотность пласта, c – его удельная теплоемкость). В то же время тепло, необходимое для полного разложения гидрата, находящегося в единичном объеме пласта, составляет $q^h = m \rho_h l_h$ (ρ_h и l_h – плотность и удельная теплота разложения гидрата). Следовательно, для отношения $\frac{q^p}{q^h} = \frac{\rho c \Delta T}{\rho_h l_h}$ при $m = 0.1$, учитывая, что $\frac{\rho}{\rho_h} \sim 1$, $\frac{c \Delta T}{l_h} \sim 2 \times 10^{-2}$, имеем $\frac{q^p}{q^h} = 2 \times 10^{-1}$. Следовательно, при снижении давления в пласте возможное снижение температуры на 10 градусов дает разложение лишь $\sim 20\%$ гидрата.

Основные классические подходы 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 [8]. При этом температура поддерживалась 325 К, и за 5 дней было извлечено 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 за 2 мес. зона разложения гидратов не продвинулась далее 5 м. 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.

Одними из первых исследований, связанных с описанием особенностей разложения газовых гидратов в пористом пласте, являются работы Веригина Н.Н., Хабибуллина И.Л. [8], Бондарева Е.А. и др. [7].

В исследовании [9] 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. Численные результаты хорошо согласуются с полученными оценками.

Работы Цыпкина Г.Г. [10–12] посвящены изучению процесса разложения газовых гидратов в пористом пласте, а также математическому моделированию процессов, протекающих в грунтах, в геотермальных системах при их освоении и в месторождениях природного газа.

В [13] построена математическая модель, описывающая процесс добычи газа из газогидратного пласта. Основные геологические и физические параметры (давление, температура и размеры месторождения) взяты на основе известных данных по Мессояхскому месторождению. Гидратная залежь эксплуатировалась около восьми лет (при постоянном отборе газа), а затем была законсервирована на три года. В исходном состоянии значения температуры в гидратном пласте, газовой подложке и окружающих горных породах были различны, но в течение последующих шести 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 2.5 МПа. Выявлено,

что дальнейшая разработка месторождения, сопровождаемая его консервацией, приводит к продолжению разложения гидрата и повышению давления в пласте.

Для разработки газогидратных залежей предложено воздействие электромагнитных волн на залежи газогидратов, что является частным случаем метода нагрева [14, 15]. Особенности воздействия высокочастотного электромагнитного излучения на газогидратный пористый пласт описаны в [16]. Предложены принципиальные технологические схемы и построены математические модели возможной добычи газа из гидратного массива путем закачки теплой воды [17, 18]. Изучено влияние различных режимов воздействия теплоносителя на интенсивность выхода газа. Моделированию фазовых превращений газогидратных включений в пористых средах посвящены работы [19, 20]. 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 оценивается по теплотворной способности газа (метана) и определяется процентом и скоростью извлечения метана. Эффективность здесь характеризуется соотношением энергозатрат на его извлечение и полученным количеством теплоты при сгорании метана.

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

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Рассматривается 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 . В центре пласта пробурена скважина радиусом r_w . Принимается следующая технологическая схема скважины, являющаяся одновременно нагревательной и добывающей метан из пласта. На рис. 1 представлена такая горизонтальная скважина внутри пласта. В ближней зоне ($r_w < r < R$) происходит разложение. Скважина состоит из двух соосных трубчатых каналов. Принимается, что внутренний канал (эксплуатационный канал) связан с пластом, насыщенным продуктами разложения гидрата (воды и метана), посредством более мелких трубок, через

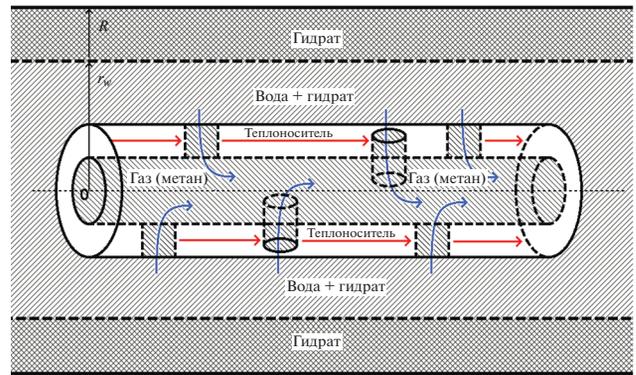


Рис. 1. Технологическая схема.

которые газ поступает из зоны разложения в эксплуатационный канал. Теплоноситель (горячая вода) течет по межтрубному каналу, пересеченному трубочками.

Условия стабильного существования гетерогенной смеси газа и его гидрата выражаются условием фазового равновесия [21, 22], которое в небольших диапазонах значений давления и температуры имеет вид

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

Здесь $T_{(s)}$ и T_{h0} – равновесные значения температур, соответствующие давлениям p и p_{s0} ; T_* – эмпирический параметр, зависящий от вида газа – гидратообразователя. В частности, для гидрата метана имеем $T_{h0} = 280$ К, $T_* = 10$ К, $p_{s0} = 5.5$ МПа. Исходные параметры системы удовлетворяют условию $T_0 < T_s(p_0)$. Индекс s (saturated) используется для обозначения параметров, соответствующих равновесным состояниям: равновесное давление $P_{(s)}(T_0)$ и температура $T_{(s)}$. Индекс h (hydrate) используется для обозначения параметров гидрата, $h0$ – их начальные значения.

Пусть через скважину закачивается горячая вода (теплоноситель) с температурой $T_{(w)}$, причем $T_{(w)} > T_s(p_0)$, а во внутренней скважине поддерживается давление $P_{(w)}$, равное равновесному значению для фазовых процессов при исходной температуре пласта $P_{(w)} = P_{(s)}(T_0)$. 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 в глубь пласта, на которой происходит процесс разложения газогидрата.

Для описания процессов тепломассопереноса, сопровождающихся разложением газогидрата, используется однотемпературная модель. Пусть пористость – постоянная величина, скелет пори-

стой среды, гидрат и вода являются несжимаемыми и неподвижными:

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

Здесь m – пористость; ρ_j и v_j ($j = g, sk, h, w$) – соответственно истинная плотность и скорость j -й фазы; p – давление; T – температура; R_g – газовая постоянная. Нижние индексы sk, h, w и g соответствуют параметрам скелета, гидрата, воды и газа. Гидрат считается двухкомпонентной системой с массовой концентрацией газа G . Гидравлическим сопротивлением пласта при фильтрации газа в области ($r_{(w)} \leq r \leq r_s$) можно пренебречь, т.е. давление в этой области однородное.

Система основных уравнений, представляющая собой уравнения неразрывности и притока тепла [23, 24] для области, содержащей метан и воду ($r_{(w)} \leq r \leq r_{(s)}$), имеет вид

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

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

Здесь r – радиальная координата, t – время, S_g – насыщенность газовой фазы. Величины удельной объемной теплоемкости ρc и коэффициента теплопроводности λ считаются постоянными, поскольку они определяются в основном параметрами скелета пористой среды.

Поскольку давление в ближней области однородное ($P = P_{(w)}$), а для давления $P_{(w)}$ выполняется условие $P_{(w)} = P_{(s)}(T_0)$, то можно считать поле температур в дальней области однородным ($r_{(s)} < r < \infty$, $T = T_0$). Это означает, что тепло, поступающее из скважины в пласт, тратится лишь на прогрев ближней области и на разложение гидрата на фронтальной границе разложения ($r = r_{(s)}$).

В качестве уравнения состояния используется уравнение калорически совершенного газа [25]:

$$p = \rho_g R_g T.$$

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

$$\rho_g = \frac{P_w}{R_g (T_0 + \Delta T)} \approx \frac{P_e}{R_g T_0} \left(1 - \frac{\Delta T}{T_0} \right) \approx \frac{P_e}{R_g T_0} = \rho_w^0. \quad (3)$$

Температура в области, насыщенной гидратом ($r_{(s)} \leq r \leq \infty$), считается постоянной и равной исходной температуре T_0 в течение всего процесса, т.е.

$$r_{(s)} \leq r \leq \infty, \quad T = T_0 (t \geq 0). \quad (4)$$

Кроме того, представленные уравнения необходимо дополнить соотношениями, следующими из условий баланса масс и тепла на границе фазового перехода ($r = r_{(s)}$):

$$\begin{aligned} m \rho_h (1 - G) (0 - \dot{r}_{(s)}) &= m S_w \rho_w (0 - \dot{r}_{(s)}), \\ m \rho_h G (0 - \dot{r}_{(s)}) &= m S_g \rho_g^0 (v_{g(s)} - \dot{r}_{(s)}), \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial r} &= -m \rho_h l_h \dot{r}_{(s)}, \quad \left(\dot{r}_{(s)} = \frac{dr}{dt} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\dot{r}_{(s)}$ – скорость движения границы фазового перехода, l_h – удельная теплота гидратообразования, S_w – насыщенность пор водой. Из первого уравнения системы (5) для величин газо- и водонасыщенности можно записать

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

Скорость газа на границе фазового перехода определяется из второго уравнения системы (5)

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

Температура на данной границе считается непрерывной и равной T_0 в соответствии с (4).

Начальные и граничные условия для определения поля температур в ближней области имеют вид

$$\begin{aligned} t = 0: T &= T_0 (r_{(w)} \leq r \leq \infty), \\ r = r_{(w)}: T &= T_{(w)} (t > 0), \\ r = r_{(s)}: T &= T_0. \end{aligned} \quad (7)$$

Другим граничным условием для данной области является, очевидно, условие (4).

Поскольку, согласно постановке задачи, давление системы не изменяется и равно $p_{(w)}$, 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 [19], 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.

КВАЗИСТАЦИОНАРНОЕ РЕШЕНИЕ

Рассмотрим случай, когда в скважине поддерживается давление, равное равновесному значению для исходной температуры пласта $p_{(w)} = p_{(s)}(T_0)$.

Данное приближение означает возможность пренебречь затратами на повышение температуры пласта в ближней области (все тепло, поступающее в пласт, уходит на разложение гидрата). Тогда, пренебрегая в уравнении (2) первым слагаемым в левой части (т.е. полагая $\partial T / \partial t = 0$), можно получить

$$r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \left(\frac{v_{(s)} r_{(s)}}{\chi} - 1 \right) \frac{\partial T}{\partial r} \quad (r_c < r < r_{(s)}), \quad (9)$$

$$v = v_{(s)} \frac{r_{(s)}}{r}, \quad \chi = \frac{\lambda}{\rho_g c_g m S_g}.$$

С учетом граничных условий

$$T = T_{(w)}, \quad r = r_{(w)} \quad \text{и} \quad T = T_0, \quad r = r_{(s)},$$

$$-\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r_{(s)}} = m \rho_h l_h \dot{r}_{(s)} \quad (10)$$

решение уравнения (9) имеет вид

$$T - T_w = \frac{C_1}{\alpha + 1} \left(\frac{r}{r_{(s)}} \right)^\alpha + C_2, \quad \alpha = \frac{v_{(s)} r_{(s)}}{\chi} - 1.$$

С учетом первого граничного условия из (10) получается дифференциальное уравнение для определения закона перемещения фронта разложения гидрата:

$$\left(\frac{r_{(s)}}{r_{(w)}} \right)^{(\alpha+1)} = \frac{A+1}{A}, \quad (11)$$

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

Это уравнение может быть приведено к виду

$$r_{(s)} \dot{r}_{(s)} = (\alpha + 1) \chi \left(1 - \frac{\rho_h G}{S_g \rho_g^0} \right)^{-1}. \quad (12)$$

Методом разделения переменных с учетом начальных условий $r_{(s)} = r_{(w)}$ при $t = 0$ решение (12) записывается в неявном виде

$$r_{(s)}^2 \ln(r_{(s)}/r_{(w)}) - (r_{(s)}^2 - r_{(w)}^2)/2 = 2\beta t,$$

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

Отсюда для начальной стадии, когда $(r_{(s)} - r_{(w)}) \approx r_{(w)}$, получается следующее решение уравнения (11):

$$r_{(s)} - r_{(w)} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\beta t}. \quad (13)$$

Поскольку в уравнении (11) при определении численным интегрированием закона движения границы фазовых переходов при начальном условии $r_{(s)} = r_{(w)}$ ($t = 0$) имеет место особенность (согласно (12) $\dot{r}_{(s)} = \infty$ при $t = 0$), то приближенное решение (13) позволяет уйти из такой особенности.

Для потока тепла от скважины, отнесенного к единице ее длины, можно записать выражение

$$q^{(T)} = -2\pi r_{(w)} \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r_{(w)}}. \quad (14)$$

Для дебита массы газа на единицу длины скважины для определяемой величины получается

$$q^{(m)} = -2\pi r_{(w)} \rho_g S_g m v_{(w)} \quad (15)$$

и с учетом (4)

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

Используя (10) и (16) для дебита скважины, окончательно можно записать

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

Введем параметр $\kappa = q^{(m)}/q^{(T)}$, определяющий массовый дебит газа, отнесенный к единице затраченного тепла, что определяет энергоэффективность добычи гидрата. Используя (14) и (15) для κ , можно получить следующее выражение:

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Для параметров, характеризующих состояние системы газ–вода–гидрат и ее физические свойства, приняты следующие значения: $m = 0.2$, $G = 0.12$, $\rho_h = 900$ кг/м³, $\rho_w = 1000$ кг/м³, $R_g = 520$ Дж/(К кг), $\lambda = 2$ Вт/(м К), $c_g = 2600$ Дж/(К кг), $p_{(w)} = 2.5$ МПа, $T_0 = 278$ К, $T_{(w)} = 292$ К, $l_h = 5 \times 10^5$ Дж/кг. Радиус скважины $r_{(w)} = 0.1$ м.

На рис. 2 представлены распределения температуры пласта в различные моменты времени. Сплошная и пунктирная линии соответствуют численному и квазистационарному решениям уравнения теплопроводности (10). С течением времени тепло, полученное от скважины, в большей части идет на прогрев прифронтной области. Видно, что температура в областях, расположенных вблизи скважины, растет, а на фронте остается равной исходной.

Графики численного решения по всей системе и квазистационарного решения неплохо согласуются (рис. 2, 3). Это означает, что в рассматриваемой задаче основные тепловые затраты идут на разложение гидрата.

На рис. 3а проиллюстрирован закон движения координаты фронта фазового перехода, рассчитанный по формуле (13). Видно, что с течением

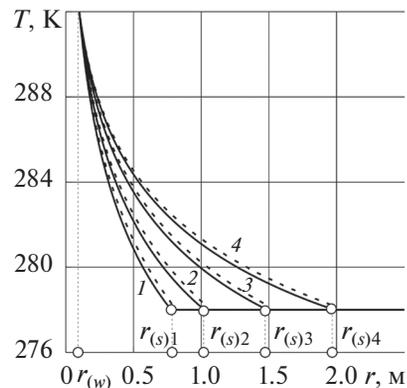


Рис. 2. Распределение температуры в пласте в различные моменты времени: 1 – 10 сут., 2 – 20, 3 – 50, 4 – 100.

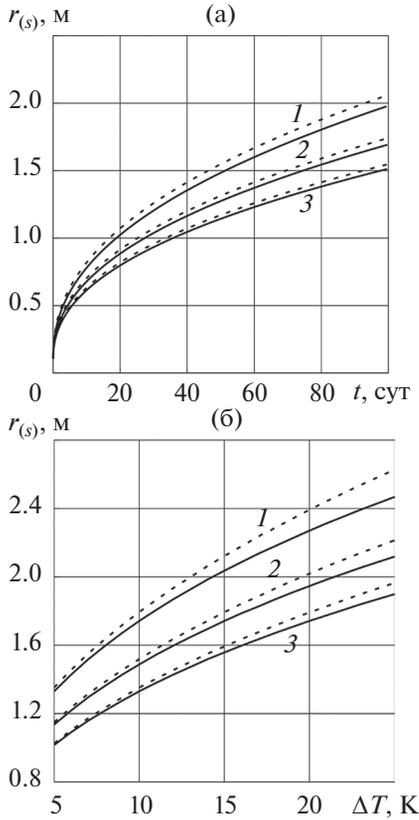


Рис. 3. Зависимость координаты границы фазового перехода от времени (а) и перепада температур для $t = 20$ сут. (б) при различных значениях пористости: 1 – $m = 0.1$, 2 – 0.15 , 3 – 0.2 .

времени скорость перемещения фронта разложения снижается. Это связано с геометрией задачи в данной постановке, поскольку с увеличением радиуса границы фронта разложения снижается удельная плотность теплового потока. Кроме этого, со временем эта область расширяется, и поэтому происходит увеличение ее теплового сопротивления. При этом с увеличением перепада температур ΔT (рис. 3б) координата фронтальной границы для одного и того же промежутка времени увеличивается. Отметим, что пунктирные кривые, полученные по квазистационарному решению, расположены выше, чем линии, соответствующие численному решению. Это связано с тем, что квазистационарное решение не учитывает затрат тепла на нагрев пласта в ближней зоне. Следует отметить также, что с увеличением пористости пласта происходит снижение скорости перемещения границы зоны разложения. Это объясняется тем, что с ростом содержания гидрата в пласте происходит увеличение расхода энергии на его разложение.

Массовый приток газа, отнесенный к единице длины скважины, определяется из соотношения

$$q_{(m)} = 2\pi r_m S_g \nu_g \rho_g = 2\pi r_s m \rho_g \left(1 - \frac{\rho_h(1-G)}{\rho_w}\right) \left(1 - \frac{\rho_h G}{\rho_g S_g}\right) \dot{r}_s.$$

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

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

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. С течением времени массовый расход газа уменьшается. Это связано с тем, что дебит газа определяется интенсивностью диссоциации гидрата, которая в дальнейшем снижается. Аналогичным образом объясняется и тот факт, что с ростом перепада температур массовый расход увеличивается (рис. 4б). При этом с течением времени увеличение пористости пласта практически не сказывается на величине массового расхода газа (рис. 4а), поскольку скорость движения газа убывает с расстоянием от центра скважины.

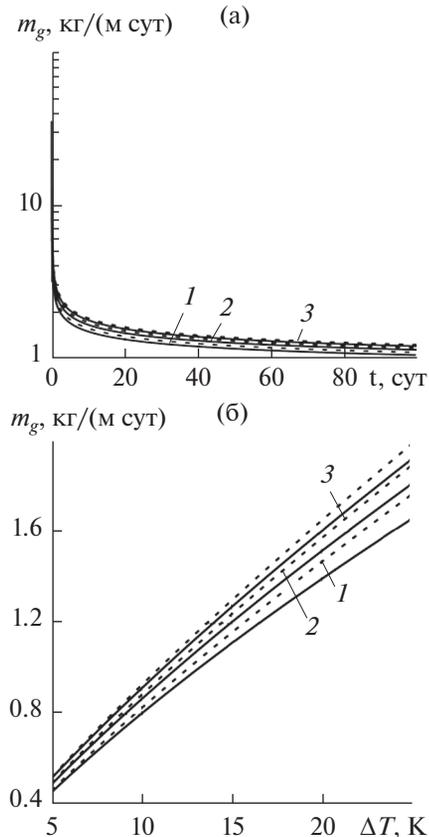


Рис. 4. Зависимость массового расхода от времени (а) и перепада температур для $t = 20$ сут. (б): 1–3 – см. рис. 3.

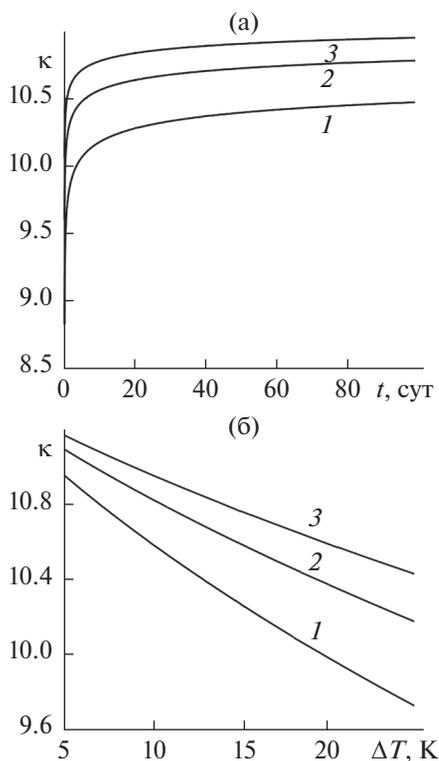


Рис. 5. Зависимость энергоэффективности разложения метана от времени (а) и перепада температур для $t = 20$ сут. (б): 1–3 – см. рис. 3.

Энергоэффективность добычи гидрата определяется введенным ранее параметром $\kappa = q^{(m)} / q^{(T)}$.

На рис. 5 представлена зависимость энергоэффективности добычи метана в зависимости от времени (рис. 5а) и перепада температур (рис. 5б). Видно, что с течением времени энергоэффективность увеличивается. Это объясняется тем, что со временем на прогрев прискважинной области требуется все меньше тепла, так как основная его часть идет на прогрев прифронтной области. При этом увеличение пористости пласта также способствует увеличению энергоэффективности добычи, поскольку в этом случае увеличивается содержание газа в пласте. Рост перепада температур (рис. 5б) приводит к снижению энергоэффективности, так как большая часть тепла расходуется на прогрев гидратного пласта.

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 эво-

люцию 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 при прогревании рабочей зоны месторождения. Предложенная теоретическая модель позволяет произвести количественную оценку отбора метана при изменении температуры нагрева, перепада давления и определить наиболее выгодные режимы с точки зрения энергоэффективности.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности, номер для публикаций FEUR-2020-0004 “Решение актуальных задач и исследование процессов в нефтехимических производствах, сопровождающихся течениями многофазных сред”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макогон Ю.Ф. Газогидраты. История изучения и перспективы освоения // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2010. № 2. С. 5.
2. Макогон Ю.Ф., Омельченко Р.Ю. Мессояха – газогидратная залежь, роль и значение // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2012. № 3. С. 5.
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. P. 265.
4. Перльштейн Г.З., Сергеев Д.О., Типенко Г.С., Тумской В.Е., Хименков А.Н., Власов А.Н., Мерзляков В.П., Станиловская Ю.В. Углеводородные газы и криолитозона шельфа Арктики // Арктика: экология и экономика. 2015. № 2. С. 35.
5. Черский Н.В., Бондарев Э.А. О тепловом методе разработки газогидратных месторождений // Докл. АН СССР. 1972. Т. 203. № 3. С. 550.
6. 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.
7. Бондарев Э.А., Максимов А.М., Цыпкин Г.Г. К математическому моделированию диссоциации газовых гидратов // Докл. АН СССР. 1989. Т. 308. № 3. С. 575.
8. Verigin N.N., Khabibullin I.L., Khalikov G.A. Axisymmetric Problem of Heat and Mass Transfer in Saturated Porous Medium // J. Eng. Phys. 1980. V. 38. № 5. P. 581.
9. 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. Publ. Date (Web): 03 Nov. 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b03256>
10. Цыпкин Г.Г. Влияние разложения газового гидрата на добычу газа из пласта, содержащего гидрат и газ в свободном состоянии // Изв. РАН. МЖГ. 2005. № 1. С. 132.
11. Цыпкин Г.Г. Течения с фазовыми переходами в пористых средах. М.: Физматлит, 2009. 232 с.

12. *Цыпкин Г.Г.* Аналитическое решение нелинейной задачи разложения газового гидрата в пласте // Изв. РАН. МЖГ. 2007. № 5. С. 133.
13. *Grover T., Moridis G., Holditch S.* Analysis of Reservoir Performance of Messoyakha Gas Hydrate Field // Proc. 18th Int. Offshore and Polar Engineering. Vancouver, Canada, 2008. P. 49.
14. *Низаева И.Г., Макогон Ю.Ф.* Воздействие электромагнитных полей на нетрадиционные виды углеводородного сырья // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2013. № 3. С. 42.
15. *Хабидуллин И.Л., Насыров Н.М.* Математическое моделирование диссоциации газовых гидратов в переменном электромагнитном поле // Фильтрация многофазных систем. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1991. С. 91.
16. *Сыртланов В.Р., Шагапов В.Ш.* Фронтальная задача о разложении газовых гидратов в пористой среде при высокочастотном электромагнитном излучении // ИФЖ. 1998. Т. 71. № 2. С. 263.
17. *Нигматулин Р.И., Шагапов В.Ш., Сыртланов В.Р.* Автомодельная задача о разложении газогидратов в пористой среде при депрессии и нагреве // ПМТФ. 1998. Т. 39. № 3. С. 111.
18. *Шагапов В.Ш., Сыртланов В.Р., Галиакбарова Э.В.* О разложении гидратов в пористой среде, заполненной гидратом и газом, при тепловом и депрессионном воздействии // Итоги исследований ИММС СО РАН. Тюмень, 1997. № 7. С. 140.
19. *Шагапов В.Ш., Хасанов М.К., Гималудинов И.К., Столповский М.В.* Особенности разложения газовых гидратов в пористых средах при нагнетании теплового газа // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20. № 3. С. 347.
20. *Чиглинцева А.С., Давлетшина М.Р., Столповский М.В.* Численное решение задачи о разложении гидрата метана при тепловом воздействии // XII Всерос. съезд по фундам. проблемам теор. и прикл. механики. Уфа, 2019. С. 1137.
21. *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.
22. *Рагимли П.И., Повещенко Ю.А., Рагимли О.Р., Подрыга В.О., Казакевич Г.И., Гасилова И.В.* Использование расщепления по физическим процессам для моделирования диссоциации газовых гидратов // Матем. моделирование. 2017. Т. 29. № 7. С. 133.
23. *Рагимли П.И., Повещенко Ю.А., Подрыга В.О., Рагимли О.Р., Ритус И.В.* Задачи совместной фильтрации в талой зоне и пьезопроводной среде с газогидратными включениями // Матем. моделирование. 2018. Т. 30. № 6. С. 95.
24. *Шагапов В.Ш., Мусакаев Н.Г.* Динамика образования и разложения гидратов в системах добычи, транспортировки и хранения газа. М.: Наука, 2016. 238 с.
25. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987.