

ОСОБЕННОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГАЗА ИЗ ГАЗОГИДРАТНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ*

Г. А. Кунсбаева², А. С. Чиглинцева^{1,2}, М. Р. Давлетшина¹

¹ — ФГБНУ Уфимского федерального исследовательского центра РАН Институт механики им. Р. Р. Мавлютова;

² — Уфимский государственный нефтяной технический университет

Поступила в редакцию 01.09.2018 г.

Аннотация. В работе предложена теоретическая модель для процесса вымывания газа из состава гидрата в режиме свободной конвекции. Представлено ранее профили температурных полей, распределение радиуса скважины, массового расхода газа и воды для трех временных циклов, где каждый цикл работы скважины длится до тех пор, пока температура воды не остынет до температуры газогидратного массива. Установлено, что за сутки происходит полная отдача тепла от теплоносителя, при этом объем вымываемого газа составляет приблизительно 900 м^3 и радиус скважины увеличивается на 30% за трое суток. Отмечено, что частая смена теплоносителя в скважине приводит к значительному росту газа, но при этом происходит не полная утилизация тепла закачиваемого теплоносителя.

Ключевые слова: гидрат, газогидратный массив, теплоноситель, скважина, теоретическая модель, свободная конвекция, дебит газа.

FEATURES OF EXTRACTION OF GAS FROM GAS-HYDRATE DEPOSITS UNDER FREE CONVECTION

G. A. Kunsbaeva, A. S. Chiglintseva, M. R. Davletshina

Abstract. The paper proposes a theoretical model for the process of leaching gas from the hydrate in the free convection mode. The profiles of temperature fields, distribution of well radius, mass flow of gas and water for three time cycles, where each well cycle lasts until the water temperature cools down to the temperature of the gas-hydrate massif, are presented earlier. It was found that during the day there is a full return of heat from the coolant, with the volume of washed gas is approximately 900 m^3 and the radius of the well increases by 30% in three days [1]. It is noted that the frequent change of coolant in the well leads to a significant increase in gas, but there is no complete utilization of the heat of the injected coolant.

Keywords: hydrate, gas hydrate array, coolant, well, theoretical model, free convection, gas flow rate.

ВВЕДЕНИЕ

Газогидраты представляют собой весьма своеобразную форму существования газа — кристаллическую ячейку из молекул воды, внутри которой размещаются молекулы метана. Ячейки образуют плотную кристаллическую решетку, похожую на лед. Выделяющийся из земных недр метан может создать в соединении с водой газогидрат только при определенном сочетании внешних условий, прежде всего при низких температурах и высоких давлениях.

* Выполнено при финансовой поддержке: Грант РФФИ 20-01-00526 А
© Кунсбаева Г. А., Чиглинцева А. С., Давлетшина М. Р., 2022

Газогидраты могут образовываться в донных осадках при давлении 16-25 атм. и температуре около 0°C . Если температура выше, то для образования газогидратов необходимо более высокое давление. Они встречаются в океанах и морях на глубине от 300 до 1200 м в виде слоев, залегающих ниже дна на несколько сотен метров. Значительно реже газогидраты встречаются вблизи морского дна (на глубине нескольких метров от его поверхности) [2, 4–6]. На Мессояхском месторождении природного газа в Западной Сибири (на левобережье Енисея) газогидраты выходят даже на поверхность. Впервые морские газогидраты были обнаружены в середине 70-х гг. в Канаде, а газогидраты, расположенные под слоями вечной мерзлоты, открыты академиком А. Трофимуком и его сотрудниками в 1975 г.

На сегодняшний день открыто более 200 месторождений газогидратов, расположенных в разных частях земного шара. Согласно исследованиям, проведенным в 80-90-е гг., запасы газа в газогидратах континентальной и шельфовой части России оцениваются величиной 100-1000 трлн м^3 . Залежи газогидратов обнаружены также в Черном море и озере Байкал. В последние годы российские ученые продолжают поиск и разведку месторождений газогидратов в кооперации с учеными Южной Кореи, Японии, Бельгии и других стран. Вследствие слабой изученности генезиса газогидратов и недостаточного объема поисковых и разведочных работ мировые запасы газогидратов по разным источникам лежат в чрезвычайно широких пределах — от нескольких сотен до нескольких тысяч триллионов кубических метров. Считается, что в газогидратах углеводородного сырья содержится в 10 раз больше, чем во всех месторождениях нефти и газа. Газогидраты — это единственный еще не разработанный и весьма перспективный источник природного газа (из 1 м^3 газогидрата можно получить 300 м^3 метана). В любом случае, при успешном решении проблем с добычей газа из газогидратов может существенно измениться облик мирового рынка энергоресурсов, а проблема “энергетического голода” отодвинуться на неопределенный срок [6–10].

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В данной работе рассматривается задача о вымывании газа из газогидратного массива в режиме свободной конвекции. На рис. 1 представлена возможная технологическая схема процесса вымывания газа из газогидратного массива, согласно этой схеме полость в газогидратном массиве заполняется теплой водой и либо консервируется до остывания воды до температуры газогидратного массива, либо до заданного момента времени в режиме свободной конвекции. Далее откачивается газ и производится смена воды. Объем извлекаемого газа при такой схеме определяется начальной температурой и объемом закачиваемой в полость воды.

Будем полагать, что газогидратный массив имеет постоянную температуру $T_{h0} = 4^{\circ}\text{C}$

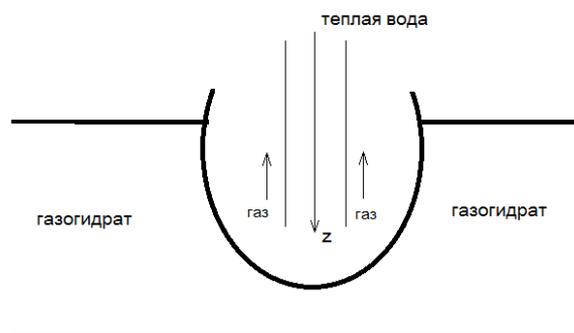


Рис. 1. Технологическая схема процесса вымывания газа из газогидратного массива.

($T_{h0} = 277$ К), поскольку температура воды около морского дна примерно равна четырем градусам по Цельсию.

Запишем уравнение баланса массы:

$$\frac{dM}{dt} = 2\pi ah j_h - J_g, \quad (1)$$

$$M = M_g + M_l.$$

Здесь M — масса двухфазной смеси, j_h — интенсивность разложения газогидрата тепловой водой со стенки скважины, отнесенная на единицу её площади, J_g — массовый расход газа.

Запишем уравнение баланса массы газа:

$$\frac{dM_g}{dt} = 2\pi ah j_h G - J_g, \quad (2)$$

где G — массовая концентрация газа в составе газогидрата.

Поскольку масса газа не накапливается в скважине, отбирается, при этом полагаем, сколько газа уходит столько же его и поступает при разложении газогидрата, поэтому массовый расход газа запишем в виде:

$$J_g = 2\pi ah k_h G. \quad (3)$$

Запишем уравнение баланса тепла в скважине:

$$Mc \frac{dT}{dt} = 2\pi ah j_h c (T_a - T) - 2\pi ah q, \quad (4)$$

$$Mc = M_g c_g + M_l c_l, \quad c = c_g G + c_l (1 - G).$$

Здесь T и T_a — температуры воды в скважине и стенки скважины; c_i ($i = g, l$) — теплоемкости газа и воды (при постоянном давлении); q — интенсивность теплообмена между теплоносителем и стенкой канала, отнесенная к единице площади стенки. Первое слагаемое в правой части уравнения (4) описывает изменение температуры теплоносителя из-за разбавления продуктами разложения газогидрата.

Жидкость будем считать несжимаемой: $p_l^0 = \text{const}$.

Интенсивность теплопередачи между теплоносителем и стенкой будем учитывать согласно теории температурных пограничных слоев при естественном конвективном течении вблизи, нагретой вертикальной пластины [5, 6]. Согласно которой можем записать:

$$q = -\frac{4}{3} \lambda (T_a - T) \theta'(0) \left(\frac{Gr}{4h} \right)^{1/4} \frac{1}{h^{3/4}}, \quad (5)$$

$$Gr = \frac{g\beta(T_a - T)h^3}{\nu^2}, \quad \theta'(0) = 1.2 (Pr = 7),$$

где Gr — число Грасгофа, β — коэффициент теплового расширения теплоносителя.

Интенсивность j_h разрушения газогидрата на поверхности скважины лимитируется интенсивностью подвода тепла к этой поверхности. Полагаем, что все подводимое тепло, идет на разложение газогидрата. Поэтому интенсивность разложение газогидрата запишем в виде:

$$j_h = \frac{q}{l_h}. \quad (6)$$

Здесь l_h — удельная теплота разложения газогидрата.

Скорость изменения радиуса скважины будем определять на основе уравнения:

$$\frac{da}{dt} = \frac{j}{p_h^0}, \quad (7)$$

где p_h^0 — плотность газогидрата.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В расчетах полагалось, что система добычи газа из газогидратного массива имеет следующие параметры: высота газогидратного массива $h = 10$ м, скважина в начальный момент времени ($t = 0$) имеет радиус $a = 1$ м, температура закачиваемой воды $T = 300$ К.

Теоретические расчеты показывают, полагая, что все тепло идет на разложение гидрата, количество газа вымываемого из гидрата объемом воды V_l

$$V_g = k_g V_l, \quad k_g = \frac{p_l}{p_g} \frac{c_l \Delta T}{l_h} G, \quad \Delta T = T_0 - T_s(p),$$

при $\Delta T = 20$ К имеем $k_g = 30$.

Количество воды вымываемой из гидрата объемом воды V_l :

$$V_{lh} = k_l V_l, \quad k_l = \frac{c_l \Delta T}{l_h} (1 - G),$$

при $\Delta T = 20$ К имеем $k_l = 0.15$.

Объем вымытого гидрата объемом воды V_l :

$$V_h = k_h V_l, \quad k_h = \frac{p_l}{p_h} \frac{c_l \Delta T}{l_h},$$

при $\Delta T = 20$ К имеем $k_h = 0.2$.

За период одного цикла работы скважины (что составляет несколько часов при $\Delta T = 20$ К), при указанных выше начальных параметрах, можно извлечь до 900 м^3 газа (метана) и разложить свыше 6 м^3 гидрата.

Ранее было представлены результаты расчетов, иллюстрирующие профили температурных полей и соответствующее распределение радиуса скважины и массового расхода газа и массы воды для трех временных циклов эксплуатации системы добычи. Каждый цикл работы скважины длится до тех пор, пока температура воды не остынет до температуры газогидратного массива. Было отмечено, что за сутки происходит полная отдача тепла от теплоносителя, при этом объем вымываемого газа составляет приблизительно 900 м^3 . и радиус скважины увеличивается на 30% за трое суток. Показано, что с течением времени профиль скважины изменяется, радиус её увеличивается более чем в два раза за 5 суток. Площадь контакта между теплоносителем и гидратом становится больше, что, в свою очередь, приводит к выделению большего количества газа. Так через трое суток работы скважины при заданном режиме прирост газа увеличивается в два раза. При этом за месяц работы такой скважины при смене теплоносителя через каждые 12 часов можно вымывать до 700 т газа [1].

На рис. 2 представлено распределение массы и объема газа (метана) вымываемого из газогидрата за месяц. Из графика видно, что за месяц работы такой скважины при смене теплоносителя через каждые 12 часов можно вымывать до 700 т газа. Ранее установлено, что масса и объем газа (метана) изменяется за каждый цикл (период одного цикла 12 ч) приблизительно на 50%. Такую же динамику можно наблюдать и для массы воды в скважине.

На рис. 3 представлено распределение массы газа, радиуса скважины и температурных полей для двух режимов работы скважины. Пунктирная линия соответствует режиму работы скважины, для которого период цикла равен 12 часов, а сплошная линия – период цикла равен 24 часа. Видно, что частая смена теплоносителя в скважине приводит к увеличению радиуса скважины на 30%, что свою очередь приводит к значительному росту газа чем на 60% за 5 суток, но при этом происходит не полная утилизация тепла закачиваемого теплоносителя. Поэтому для повышения эффективности представленной технологической схемы,

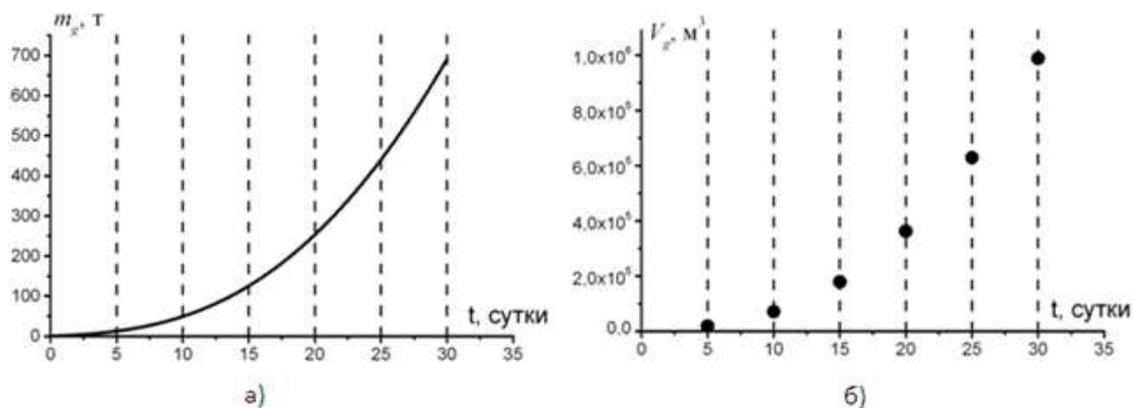


Рис. 2. Распределение а) массы и б) объема газа (метана) вымываемого из газогидрата за месяц.

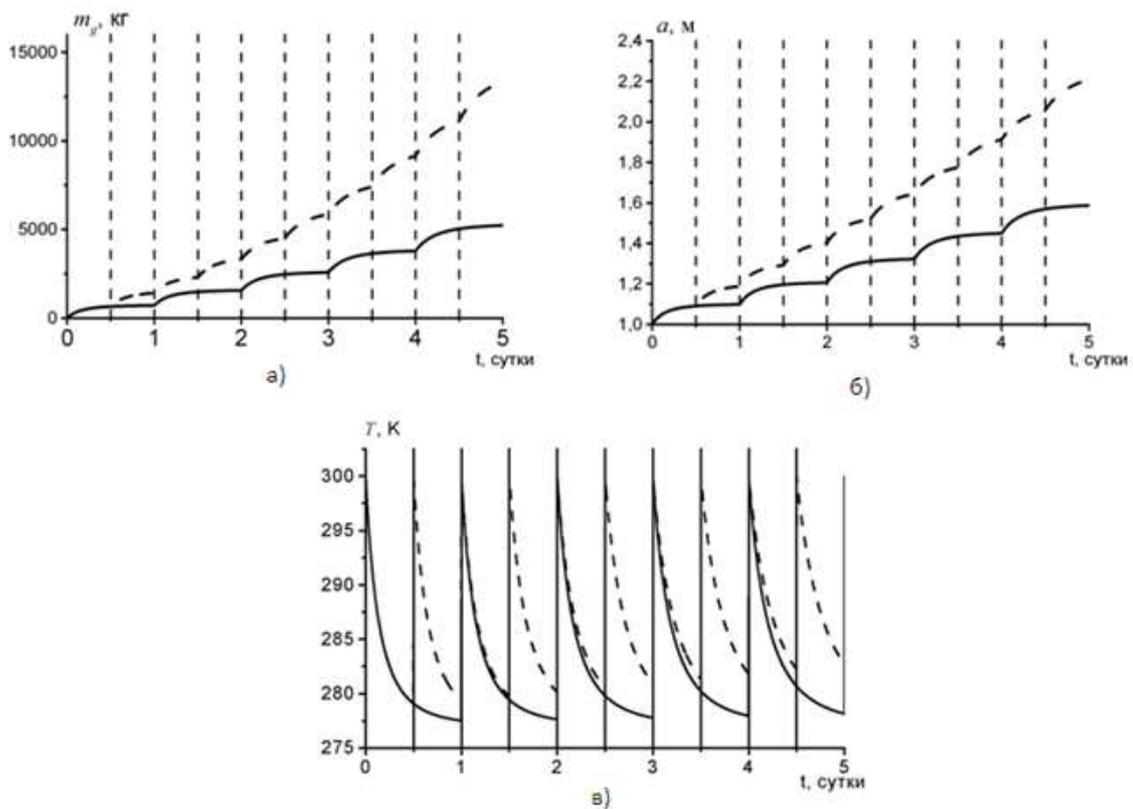


Рис. 3. Распределение а) массы газа, б) радиуса скважины и в) температурных полей в скважине для двух режимов работы скважины.

необходимо предусмотреть меры, способствующие более полную утилизацию тепла, подаваемой в гидратную полость воды. Например, последовательная смена режимов воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе, на основе предложенной технологической схемы и теоретической модели, анализируется возможность и целесообразность извлечения газа из состава газогидратного массива в режиме свободной конвекции.

Проанализированы условия извлечения газа с целью определения режимов, обеспечивающих максимальный теплосъем от инжектируемого теплоносителя и стабильный дебит газа. Установлено, что частая смена теплоносителя в скважине приводит к значительному росту газа, но при этом происходит не полная утилизация тепла закачиваемого теплоносителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кунсбаева, Г. А. К теории получения газа из газогидрата в режиме свободной конвекции / Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева // Г. А. Кунсбаева, А. С. Чиглинцева. — 2018. — № 1 (91). — С. 5–10.
2. Якуцени, П. Газогидраты – нетрадиционное газовое сырье, их образование и геологические ресурсы / П. Якуцени // Нефтегазовая геология. Теория и практика. — 2013. — Т. 8, № 4.
3. Шагапов, В. Ш. Теоретическая модель получения газа из газогидратных валунов / В. Ш. Шагапов, А. С. Чиглинцева, Г. А. Кунсбаева // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. — 2014. — № 4. — С. 205–211.
4. Бык, С. Ш. Газовые гидраты / С. Ш. Бык, Ю. Ф. Макогон, В. И. Фомина. — М. : Химия, 1980. — 296 с.
5. Истомин, В. С. Газовые гидраты в природных условиях / В. С. Истомин, В. С. Якушев. — М. : Недра, 1992. — 236 с.
6. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: учебное пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — М. : Наука, 1986. — 736 с.
7. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. — М. : Наука, 1974.
8. Кэрролл, Дж. Гидраты природного газа / Дж. Кэрролл. — М. : Технопресс, 2007. — 316 с.
9. Дмитриевский, А. Н. Газогидраты морей и океанов — источник углеводородов будущего / А. Н. Дмитриевский, И. Е. Баланиук. — М. : ИРЦ Газпром, 2009. — 416 с.
10. Makogon, Y. F. Natural gas hydrates — A promising source of energy / Y. F. Makogon // Journal of Natural Gas Science and Engineering. — 2010. — № 2. — P. 49–59.

REFERENCES

1. Kunsbaeva G.A., Chiglintseva A.S. To the theory of producing gas from hydrate in the regime of free convection. [Kunsbaeva G.A., Chiglintseva A.S. K teorii polucheniya gaza iz gazogidrata v rezhime svobodnoj konvekcii]. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva — Vestnik KGTU of A.N. Tupolev*, 2018, no. 1(91), pp. 5–10.
2. Yakutseni P. Gashydrates-unconventional gas raw materials, their formation and geological resources. [Yakuceni P. Gazogidraty – netradicionnoe gazovoe syr'e, ih obrazovanie i geologicheskie resursy]. *Neftgazovaya geologiya. Teoriya i praktika — Neftgazovaya Geologiya. Theory and practice*, 2013, vol. 8, no. 4.
3. Shagapov V.S., Chiglintseva A.S., Kunsbaeva G. A. Theoretical model of producing gas from gas hydrate boulders. [Shagapov V.SH., Chiglintseva A.S., Kunsbaeva G.A. Teoreticheskaya model' polucheniya gaza iz gazogidratnyh valunov]. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva — Vestnik KGTU im. A.N. Tupolev*, 2014, no. 4, pp. 205–211.

4. Byk S.Sh., Makogon Y.F., Fomin V.I. Gashydrates. [Byk S.SH., Makogon YU.F., Fomina V.I. Gazovye gidraty]. Moscow: Chemistry, 1980, 296 p.
5. Istomin V.S, Yakushev V.S. Gas hydrates in natural conditions. [Istomin V.S., YAKushev V.S. Gazovye gidraty v prirodnyh usloviyah]. Moscow: Nedra, 1992, 236 p.
6. Landau L.D., Lifshits E.M. Theoretical physics: textbook. V. 10, vol. VI. Hydrodynamics. [Landau L.D., Lifshic E.M. Teoreticheskaya fizika: uchebnoe posobie. V 10 T. T. VI. Gidrodinamika]. Moscow: Science, 1986, 736 p.
7. Schlichting G. The theory of the boundary layer. [SHlihting G. Teoriya pogramichnogo sloya]. Moscow: Science, 1974.
8. Carroll J. Hydrates of natural gas. [Kerroll Dzh. Gidraty prirodnogo gaza]. Moscow, 2007, 316 p.
9. Dmitrievsky A.N., Balanyuk I.E. Gashydrates of the seas and oceans – the source of hydrocarbons of the future. [Dmitrievskij A.N., Balanyuk I.E. Gazogidraty morej i okeanov – istochnik uglevodorodov budushchego]. Moscow: IRTS Gazprom, 2009, 416 p.
10. Makogon Y.F. Natural gas hydrates – A promising source of energy // Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2010, no. 2, pp. 49–59.

*Кунсбаева Гульназ Абдулхаковна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования “Уфимский государственный нефтяной технический университет”, г. Уфа, Россия
E-mail: kun_gulnaz@mail.ru*

*Kunsbaeva Gulnaz Abdulhakovna, candidate of physico-mathematical sciences, associate Professor of physics Federal state budgetary educational institution of higher professional education Ufa state oil technical University, Ufa, Russia
E-mail: kun_gulnaz@mail.ru*

*Чиглинцева Ангелина Сергеевна, доцент, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Федерального Государственного Бюджетного Научного Учреждения Уфимского федерального исследовательского центра РАН Института механики им. Р. Р. Мавлютова, г. Уфа, Республики Башкортостан РФ; Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования “Уфимский государственный нефтяной технический университет”, г. Уфа, Россия
E-mail: changelina@rambler.ru
Тел.: +7(34784)34963*

*Chiglintseva Angelina Sergeevna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher Federal State Budget Scientific Institution of the Ufa Federal Research Center of the RAS Institute of Mechanics. R.R. Mavlyutova, Ufa, the Republic of Bashkortostan RF; Federal state budgetary educational institution of higher professional education Ufa state oil technical University, Ufa, Russia
E-mail: changelina@rambler.ru
Tel.: +7(34784)34963*

Давлетшина Миляуша Рафаэлевна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования “Уфимский государственный нефтяной технический университет”, г. Уфа, Россия
E-mail: davletshina@yandex.ru
Тел.: +7(34784) 34963

*Davletshina Milyausha Rafaelevna, candidate of agricultural Sciences, associate Professor of physics Federal state budgetary educational institution of higher professional education Ufa state oil technical University, Ufa, Russia,
E-mail: davletshina@yandex.ru
Tel.: +7(34784) 34963*