

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ППАЗМЫ

Наиль Габсалямович МУСАКАЕВ¹
Станислав Леонидович БОРОДИН²
Марат Камиллович ХАСАНОВ³

УДК 532.546, 536.421

ДИНАМИКА РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ С УЧЕТОМ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЬДА*

¹ доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник, Тюменский филиал
Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН;
профессор, Тюменский государственный университет
musakaev@ikz.ru

² кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник, Тюменский филиал
Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН;
Тюменский государственный университет
borodin@ikz.ru

³ кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры прикладной информатики и программирования,
Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета
hasanovmk@mail.ru

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ и
Республики Башкортостан (проект 17-48-020123 p_a).

Цитирование: Мусакаев Н. Г. Динамика разложения газовых гидратов в пористой среде с учетом формирования льда / Н. Г. Мусакаев, С. Л. Бородин, М. К. Хасанов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2017. Том 3. № 1. С. 46-57.
DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-1-46-57

Аннотация

Природный газ является одним из основных энергоносителей, например, в 2014 году на него приходилось около 22% от мировой произведенной электроэнергии. При этом главным компонентом природного газа является метан (77-99%). Наибольшие запасы метана сосредоточены в газовых гидратах; по разным оценкам, их суммарный объем на два порядка превышает объем традиционных извлекаемых запасов метана. Таким образом, учитывая увеличивающийся спрос и наибольший, среди ископаемых топлив, объем запасов в природе, метан из газовых гидратов является наиболее перспективным источником энергии. А для эффективной добычи метана из газогидратных месторождений необходима теоретическая проработка.

В данной работе рассматривается задача разложения газового гидрата на газ и лед при отборе газа из гидратосодержащей залежи, насыщенной в исходном состоянии метаном и его гидратом. Для решения указанной задачи построена математическая модель неизотермической фильтрации несовершенного газа с учетом образования/разложения гидрата этого газа. На основе данной модели проведено численное исследование влияния массового отбора газа на динамику разложения гидрата. Показано, что в случае отрицательной начальной температуры пласта, диссоциация газового гидрата всегда будет происходить на газ и лед. При этом возможны режимы диссоциации гидрата как с фронтальной поверхностью, так и с объемной областью фазовых переходов. Установлено, что увеличение массового расхода отбора газа сначала ведет к разложению гидрата на фронтальной поверхности, а затем и в объемной зоне. Дальнейшее увеличение расхода ведет к росту протяженности объемной зоны и количества разлагающегося в ней гидрата.

Ключевые слова

Разложение газового гидрата, математическая модель, автомодельное решение, пористая среда, неизотермическая фильтрация газа, нетрадиционные источники энергии, численное исследование, метан.

DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-1-46-57

Введение

В современном мире уровень жизни отдельных стран определяется частично их местоположением и конкретными уровнями потребления энергии [18]. Качество жизни в каждой стране определяется не столько энергоресурсами, которыми она располагает, а потреблением энергии каждым из ее жителей. В то время как уровни потребления энергии более 200 лет назад были примерно одинаковыми в разных странах, в настоящий момент разрыв в потреблении энергии между отдельными странами достиг порядка и более. Например, в США проживает около 5% всего населения планеты, а потребление энергии составляет 22% от производимой энергии в мире [18]. В то же время население Индии составляет около 20%, но потребление энергии не превышает 3,2%, т. е. потребление энергии на душу населения в США в 30 раз выше, чем в Индии. В связи

с этим вполне понятны широко ведущиеся поиски новых, нетрадиционных источников энергоресурсов [3].

Источники энергии могут в значительной мере меняться в зависимости от уровня развития цивилизации. Сегодня некоторые страны, такие как Япония и Южная Корея, импортируют более 98% энергии, которую они используют [18]. При этом значительная часть потребляемых этими странами энергоресурсов транспортируется за тысячи километров.

Однако огромные потенциальные ресурсы природного газа (в первую очередь, метана) находятся весьма близко к Японии и Южной Корее, а именно в залежах газовых гидратов. На сегодняшний день в мире обнаружено свыше двухсот газогидратных месторождений [17]. Потенциальное количество природного газа в мире в гидратах превышает 15 квадриллионов кубометров [18]. Промышленная добыча только 15% этого газа обеспечит мир энергией в течение 200 лет при нынешнем уровне потребления. Производство природного газа из гидратов может быть использовано для содействия не только устойчивому экономическому развитию отдельных стран, но и политической стабильности в мире.

Существование природных газогидратов было доказано в 1960-х годах [1; 5]. Проблема разработки гидратосодержащих залежей может стать одной из важных проблем XXI века. Ряд стран, в том числе США, Россия, Япония, Индия, Китай, Южная Корея и др., имеют национальные исследовательские программы по изучению и промышленному производству природного газа из газогидратов [18].

Основные методы разработки залежей газогидратов включают снижение давления, нагревание, ввод ингибитора, закачку в пласт диоксида углерода. При депрессионном методе разработки газогидратных месторождений необходимо, чтобы давление в пласте стало ниже равновесного давления разложения гидрата. В этом случае газогидрат начинает распадаться на газ и воду (лед), поглощая при этом тепло. Если разложение гидрата происходит на газ и лед, то это позволяет уменьшить энергетические затраты на разработку газогидратных месторождений, т. к. удельная теплота фазового перехода «гидрат – газ и лед» в несколько раз меньше теплоты фазового перехода «гидрат – газ и вода».

Важность теоретического изучения депрессионного метода разработки газогидратных залежей вполне очевидна, т. к. полученные при таком исследовании результаты в значительной мере уменьшают объем необходимых экспериментальных и промысловых данных, а представление о сути изучаемых процессов даст возможность непосредственного управления ими [15; 16].

Математическое моделирование процесса разложения газового гидрата в пористой среде на газ и воду (лед) представлены в ряде работ [2; 6; 9-15]. В них построены аналитические решения указанной задачи и, в частности, показано, что возможны режимы, как с фронтальной поверхностью диссоциации газового гидрата, так и с объемной областью фазовых переходов. В настоящей работе предложена математическая модель разложения газогидрата в случае отрица-

тельной (меньше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) начальной (до начала эксплуатации скважины) температуры пласта. В модели учтены основные особенности этого процесса: неизо-термическое фильтрационное течение газа, фазовые переходы, реальные свойства газа, эффект адиабатического охлаждения и эффект Джоуля-Томсона.

Математическая модель

Рассмотрим следующую постановку задачи. Пусть поры горизонтального пористого пласта в исходном состоянии заполнены метаном и его гидратом, давление p_0 и температура T_0 ($T_0 < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) которых соответствуют термодинамическим условиям существования их в свободном состоянии [6; 9]:

$$t = 0, r_w < r < R_k : T = T_0, p = p_0, S_h = \nu, S_g = 1 - \nu, \quad (1)$$

где t — время; r_w и R_k — радиус скважины и радиус контура питания; S_j ($j = g, h, i$) — насыщенность пор j -й фазой (g — газ, h — гидрат, i — лед); ν — начальная гидратонасыщенность. Координата r отсчитывается от центральной оси скважины.

Пусть через скважину, вскрывшую пласт на всю толщину, отбирается газ с постоянным массовым расходом Q (на единицу высоты скважины) при условии отсутствия кондуктивного потока тепла на границе скважины:

$$t > 0, r = r_w : r \frac{\partial p^2}{\partial r} = \frac{Q z_g \mu_g R_g T}{\pi k S_g^3}, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad (2)$$

где k — абсолютная проницаемость пласта; μ_g и z_g — коэффициенты динамической вязкости и сверхсжимаемости газа; R_g — удельная газовая постоянная.

На скважине ($r = r_w$) происходит снижение давления. При значениях давления, меньших равновесного, газовый гидрат разлагается, и в пласте могут возникнуть три характерные области: первая, где поры заполнены газом и льдом (водой); вторая, в которой газ, лед (вода) и гидрат находятся в равновесии; третья, насыщенная газом и гидратом (рис. 1). Соответственно на поверхности между второй и третьей областями ($r = r_{(d)}$) начинается диссоциация газового гидрата, а на границе между первой и второй зонами ($r = r_{(n)}$) она заканчивается. Исходная гидратонасыщенность пласта ν равна гидратонасыщенности третьей области и постоянна во всех точках этой зоны.

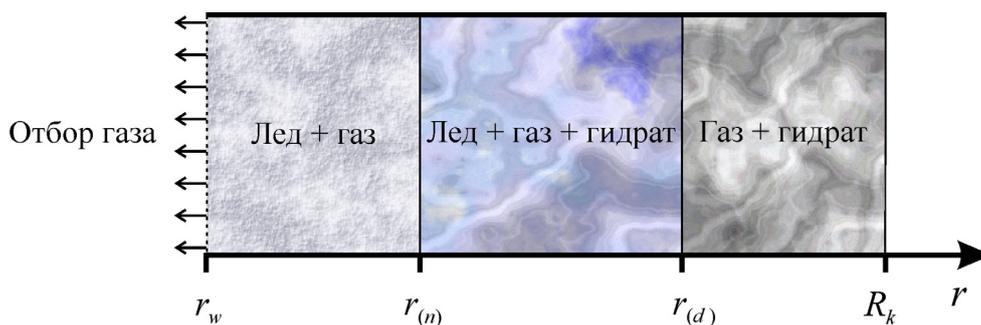


Рис. 1. Схема задачи о диссоциации газового гидрата в пласте на газ и лед

Fig. 1. Scheme of the problem of the gas hydrate dissociation to gas and ice in a reservoir

На границе скважины можно записать и другое граничное условие, а именно: газ отбирается при постоянном забойном давлении p_w :

$$t > 0, r = r_w: p = p_w < p_0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0.$$

На правой границе запишем условия по температуре и давлению:

$$t > 0, r = R_k: \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (3)$$

Примем следующие упрощающие предположения: пористость пласта m постоянна; скелет пористой среды, газовый гидрат и лед несжимаемы и неподвижны; температуры пористой среды и насыщающего вещества совпадают (однотемпературная модель). Гидрат является двухкомпонентной системой с массовой концентрацией газа G . Будем рассматривать гидрат метана, массовая концентрация которого в гидрате слабо зависит от давления и температуры ($G = 0,11-0,13$), поэтому пренебрежем зависимостью массовой концентрации газа в гидрате от давления и температуры [15].

С учетом вышеперечисленных допущений уравнения сохранения масс для газа (в свободном состоянии и в гидрате), льда и гидрата метана можно записать в следующем виде [8; 9; 15]:

$$\frac{\partial(\rho_g m S_g)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_g m S_g v_g) = GJ, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_i m S_i)}{\partial t} = (1-G)J, \quad \frac{\partial(\rho_h m S_h)}{\partial t} = -J, \quad \sum_{j=g,h,i} S_j = 1,$$

где ρ_j ($j = g, h, i$) — плотность j -й фазы; v_g — скорость газа; J — интенсивность разложения газового гидрата.

Для фильтрации газа примем закон Дарси:

$$m S_g v_g = - \frac{k_g}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial r}. \quad (5)$$

Здесь p — давление; k_g и μ_g — соответственно проницаемость и динамическая вязкость газовой фазы.

Уравнение притока тепла при отмеченных допущениях имеет вид [8; 15]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_g c_g m S_g v_g \frac{\partial T}{\partial r} =$$

$$= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \rho_g c_g m S_g v_g \varepsilon \frac{\partial p}{\partial r} + \rho_g c_g m S_g \eta \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (m \rho_h L_h S_h), \quad (6)$$

$$\rho c = (1-m) \rho_{sk} c_{sk} + m \sum_{j=i,h,g} S_j \rho_j c_j, \quad \lambda = (1-m) \lambda_{sk} + m \sum_{j=i,h,g} S_j \lambda_j,$$

$$\varepsilon = - \frac{1}{\rho_g c_g} \frac{T}{z_g} \left(\frac{\partial z_g}{\partial T} \right)_p, \quad \eta = \frac{1}{\rho_g c_g} - \varepsilon,$$

где T — температура; λ_j и c_j ($j = g, h, i$) — коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость j -й фазы; ρ_{sk} , λ_{sk} и c_{sk} — плотность, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость скелета пористой среды; ε и η — коэффициент дресселирования и адиабатический коэффициент; L_h — теплота разложения гидрата; ρc и λ — удельная объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности системы «пласт – насыщающее вещество».

Для газа уравнение состояния примем в виде:

$$p = z_g \rho_g R_g T. \quad (7)$$

Коэффициент сверхсжимаемости z_g определим на основе уравнения Латонова-Гуревича [4]:

$$z_g = (0,17376 \cdot \ln(T/T_c) + 0,73)^{p/p_c} + 0,1 \cdot p/p_c,$$

где T_c и p_c — критические параметры газа.

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

$$T = T_0 + T_* \ln(p/p_{s0}),$$

где p_{s0} — равновесное давление, соответствующее исходной температуре пласта T_0 ; T_* — эмпирический параметр, зависящий от вида газового гидрата и фаз, на который он разлагается.

Для коэффициента проницаемости газа k_g примем формулу Козени: $k_g = k \cdot S_g^3$ (k – проницаемость пласта). Вследствие неподвижности фаз (воды, гидрата и льда), а также малого отличия плотности гидрата метана от плотности льда, можно пренебречь изменением значения газонасыщенности, а значит и проницаемости при диссоциации газогидрата [9].

Численная реализация

Система уравнений (4)-(7) с заданными начальными и граничными условиями (1)-(3) в работе была решена численно, при этом использованы неявная разностная схема, метод прогонки и оригинальный авторский метод для расчета гидратонасыщенности [7]. В расчетах принимались следующие значения параметров [1; 3; 9; 15; 16]: $p_0 = 2,8$ МПа; $T_0 = 270,15$ К (-3°C); $r_w = 0,1$ м; $R_k = 500$ м; $m = 0,1$; $k = 10^{-14}$ м²; $S_{h0} = 0,2$; $p_c = 4,6$ МПа; $T_c = 190,6$ К; $T_* = 30$ К; $p_{s0} = 2,54$ МПа; $c_{sk} = 1000$ Дж/(кг·К); $c_h = 2080$ Дж/(кг·К); $c_i = 2060$ Дж/(кг·К); $\lambda_{sk} = 1,5$ Вт/(м·К); $\lambda_h = 0,45$ Вт/(м·К); $\lambda_i = 2,2$ Вт/(м·К); $R_g = 518,3$ Дж/(кг·К); $\rho_{sk} = 2000$ кг/м³; $\rho_h = 900$ кг/м³; $\rho_i = 900$ кг/м³; $G = 0,12$; $L_h = 1,66 \cdot 10^5$ Дж/кг; время расчетов составило 30 сут; значения удельной теплоемкости, коэффициентов теплопроводности и динамической вязкости для метана определялись путем интерполяции табличных данных.

Тестирование программы проводилось путем сравнения результатов численного эксперимента и расчетов, проведенных с учетом авторских решений из работы [9]. Данное сравнение показало удовлетворительное согласие.

На рис. 2 приведены распределения температуры и гидратонасыщенности для разных значений массового расхода отбора метана Q из гидратосодержащего пласта. Видно, что в зависимости от величины Q возможны три случая.

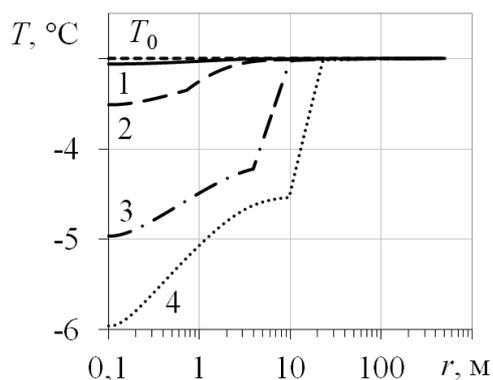


Рис. 2. Распределение по координате r температуры (слева) и гидратонасыщенности (справа) при разложении гидрата метана на газ и лед. Линии 1, 2, 3 и 4 соответствуют $Q = 100, 300, 500$ и 700 кг/(м·сут)

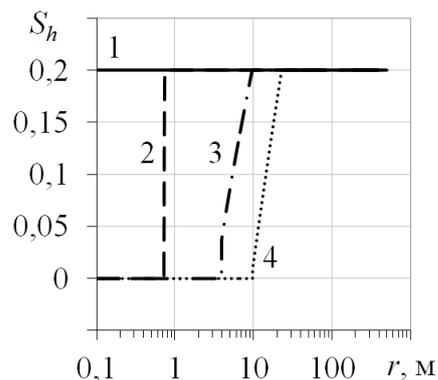


Fig. 2. Distributions by the radial coordinate r of the temperature (left) and hydrate saturation (right) when the methane hydrate decomposes to gas and ice. Lines 1, 2, 3 and 4 correspond to $Q = 100, 300, 500$ and 700 kg/(m·day)

Первый случай характеризуется отсутствием разложения гидрата (линия 1), во втором случае диссоциация газового гидрата полностью происходит на фронтальной границе (линия 2), в третьем – возникает протяженная объемная зона фазовых переходов (линии 3 и 4).

Температура в протяженной области фазовых переходов (во второй области) опускается ниже исходной температуры пласта, что обусловлено поглощением скрытой теплоты разложения гидрата. В первой области снижение температуры газа происходит вследствие действия эффектов адиабатического охлаждения и Джоуля-Томсона при фильтрации газа. Следовательно, в случае отрицательной начальной температуры пласта диссоциация газового гидрата всегда будет происходить на газ и лед. Кроме того, объемная зона возникает при больших значениях массового расхода отбора газа (больших значениях градиента давления), т. е. при росте величины Q становится невозможным рассмотрение изучаемого процесса в рамках фронтальной схемы. Также из рис. 2 следует, что увеличение массового расхода отбора газа ведет к росту протяженности второй области и доли гидрата, разлагающегося в этой области.

Заключение

Предложена математическая модель процесса разложения в пласте гидрата метана на газ и лед с учетом неизотермического фильтрационного течения, реальных свойств газа, фазовых переходов, эффектов адиабатического охлаждения и Джоуля-Томсона. Расчетным путем показано, что в случае отрицательной (меньше 0 °C) начальной (до начала эксплуатации скважины) температуры пласта разложение газового гидрата в пористой среде всегда происходит с образованием льда либо на фронтальной поверхности, либо в протяженной области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бык С. Ш. Газовые гидраты / С. Ш. Бык, Ю. Ф. Макогон, В. И. Фомина. М.: Химия, 1980. 296 с.
2. Васильев В. И. Численное исследование разложения газовых гидратов, сосуществующих с газом в природных пластах / В. И. Васильев, В. В. Попов, Г. Г. Цыпкин // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2006. № 4. С. 127-134. DOI: 10.1007/s10697-006-0078-z
3. Истомин В. А. Газовые гидраты в природных условиях / В. А. Истомин, В. С. Якушев. М.: Недра, 1992. 236 с.
4. Латонов В. В. Расчет коэффициента сжимаемости природного газа / В. В. Латонов, Г. Р. Гуревич // Газовая промышленность. 1969. № 2. С. 7-9.
5. Макогон Ю. Ф. Гидраты природных газов / Ю. Ф. Макогон. М.: Недра, 1974. 208 с.
6. Мусакаев Н. Г. Математическое моделирование процесса добычи газа из газогидратной залежи с учетом образования льда / Н. Г. Мусакаев, М. К. Хасанов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2014. № 7. С. 43-50.
7. Мусакаев Н. Г. Математическая модель и алгоритм решения задачи неизотермической фильтрации газа в пласте с учетом разложения гидрата / Н. Г. Мусакаев, С. Л. Бородин, Д. С. Бельских // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2017. Т. 9. № 2. С. 22-29. DOI: 10.14529/mmph170203
8. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред / Р. И. Нигматулин. М.: Наука, 1987.
9. Хасанов М. К. Особенности диссоциации газогидратов с образованием льда в пористой среде / М. К. Хасанов, Н. Г. Мусакаев, И. К. Гималтдинов // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 5. С. 1022-1030. DOI: 10.1007/s10891-015-1284-5
10. Цыпкин Г. Г. Аналитическое решение нелинейной задачи о разложения газового гидрата в пласте / Г. Г. Цыпкин // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2007. № 5. С. 133-142. DOI: 10.1134/S0015462807050122
11. Цыпкин Г. Г. Математическая модель диссоциации газовых гидратов, сосуществующих с газом в пластах / Г. Г. Цыпкин // Доклады Академии наук. 2001. Т. 381. № 1. С. 56. DOI: 10.1134/1.1424377
12. Цыпкин Г. Г. О режимах диссоциации газовых гидратов в высокопроницаемых пластах / Г. Г. Цыпкин // Инженерно-физический журнал. 1992. Т. 63. № 6. С. 714-721. DOI: 10.1007/BF00853524
13. Цыпкин Г. Г. Течения с фазовыми переходами в пористых средах / Г. Г. Цыпкин. М.: Физматлит, 2009. 232 с.
14. Шагапов В. Ш. Особенности разложения газовых гидратов в пористых средах при нагнетании теплого газа / В. Ш. Шагапов, М. К. Хасанов, И. К. Гималтдинов, М. В. Столповский // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20. № 3. С. 347-354. DOI: 10.1134/S0869864313030104
15. Шагапов В. Ш. Динамика образования и разложения гидратов в системах добычи, транспортировки и хранения газа / В. Ш. Шагапов, Н. Г. Мусакаев. М.: Наука, 2016. 238 с.

16. Chernov A. A. New hydrate formation methods in a liquid-gas medium / A. A. Chernov, A. A. Pil'Nik, D. S. Elistratov, I. V. Mezentsev, A. V. Meleshkin, M. V. Bartashevich, M. G. Vlasenko // Scientific Reports. 18 January 2017. Vol. 7. No. 40809.
DOI: 10.1038/srep40809
17. Makogon Y. F. Natural gas hydrates – A promising source of energy / Y. F. Makogon // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2010. Vol. 2. No. 1. Pp. 49-59.
DOI: 10.1016/j.jngse.2009.12.004
18. Makogon Y. F. Natural Gas-Hydrates – a Potential Energy Source for the 21st Century / Y. F. Makogon, S. A. Holditch, T. Y. Makogon // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2007. Vol. 56. Pp. 14-31. DOI: 10.1016/j.petrol.2005.10.009

Nail G. MUSAKAEV¹
Stanislav L. BORODIN²
Marat K. KHASANOV³

**DYNAMICS OF THE GAS HYDRATES DECOMPOSITION
IN A POROUS MEDIUM TAKING INTO ACCOUNT
THE FORMATION OF ICE***

- ¹ Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Scientist Officer,
Tyumen Branch of Khristianovich Institute of Theoretical
and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the RAS;
Professor, Tyumen State University
musakaev@ikz.ru
- ² Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher, Tyumen Branch
of Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
of the Siberian Branch of the RAS; Tyumen State University
borodin@ikz.ru
- ³ Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor,
Department of Applied Informatics and Programming,
Sterlitamak Branch of the Bashkir State University
hasanovmk@mail.ru

Abstract

Natural gas is one of the main energy carriers, for example, in 2014 it accounted for about 22% of the world's electricity production. The main component of natural gas is methane (77-99%). The largest reserves of methane are concentrated in gas hydrates; according to different sources, their total volume twice exceeds the magnitude of the traditional recoverable reserves of methane. Thus, given the increasing demand and the largest amount compared with other fossil fuels, methane, extracted from gas hydrates, is the most promising source of energy. And for the effective extraction of methane from gas hydrate deposits, theoretical studies are needed.

* The research was carried out with the partial financial support of the Russian Foundation for Basic Research and the Republic of Bashkortostan (project number 17-48-020123 p_a).

Citation: Musakaev N. G., Borodin S. L., Khasanov M. K. 2017. "Dynamics of the Gas Hydrates Decomposition in a Porous Medium Taking into Account the Formation of Ice". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 3, no 1, pp. 46-57. DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-1-46-57

In this paper we consider the problem of gas hydrate decomposition to gas and ice during the gas extraction from the hydrate-containing deposit initially saturated with methane and its hydrate. To solve this problem, we constructed the mathematical model of non-isothermal filtration of an imperfect gas with account of the formation or decomposition of this gas' hydrate. On the basis of this model, the numerical study of the influence of gas mass flow rate on the dynamics of decomposition of the hydrate was made. It shows that in the case of negative initial temperatures of the reservoir, the dissociation of the gas hydrate will always occur to gas and ice. In this case, regimes of dissociation of the hydrate with a frontal surface or a volume region of phase transitions are possible. It is established that an increase in the mass flow rate of gas extraction first leads to the decomposition of the hydrate on a frontal surface, and then in a volume zone. A further increase in the gas mass flow rate leads to an increase in the length of the volume zone and an increase in the amount of the hydrate decomposed therein.

Keywords

Decomposition of gas hydrate, mathematical model, self-similar solution, porous medium, nonisothermal gas filtration, nonconventional sources of energy, numerical study, methane.

DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-1-46-57

REFERENCES

1. Byk S. Sh., Makogon Yu. F., Fomina V. I. 1980. *Gazovye gidraty [Gas Hydrates]*. Moscow: Khimiya, 296 p.
2. Vasil'ev V. I., Popov V. V., Tsytkin G. G. 2006. "Numerical Investigation of the Decomposition of Gas Hydrates Coexisting with Gas in Natural Reservoirs". *Fluid Dynamics*, vol. 41, no 4, pp. 599-605. DOI: 10.1007/s10697-006-0078-z
3. Istomin V. A., Yakushev V. S. 1992. *Gazovye gidraty v prirodnykh usloviyakh [Gas Hydrates in Natural Conditions]*. Moscow: Nedra, 236 p.
4. Latonov V. V., Gurevich G. R. 1969. "Raschet koeffitsienta szhimaemosti prirodnogo gaza" [Calculation of the Compressibility Factor of Natural Gas]. *Gazovaya promyshlennost'*, no 2, pp. 7-9.
5. Makogon Yu. F. 1974. *Gidraty prirodnykh gazov [Hydrates of Natural Gases]*. Moscow: Nedra, 208 p.
6. Musakaev N. G., Khasanov M. K. 2014. "Matematicheskoe modelirovanie protsessa dobychi gaza iz gazogidratnoy zalezhi s uchetom obrazovaniya l'da" [Mathematical Modeling of Gas Extraction from a Gas-Hydrate Reservoir with Account of the Ice Formation]. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, no 7, pp. 43-50.
7. Musakaev N. G., Borodin S. L., Belskikh D. S. 2017. "Matematicheskaya model' i algoritm resheniya zadachi neizotermicheskoy fil'tratsii gaza v plaste s uchetom razlozheniya gidrata" [Mathematical Model and Algorithm for Solving the Problem of Non-Isothermal Gas Filtration in Reservoir in Case of Hydrate Decomposition]. *Bulletin of the South Ural State University Series "Mathematics. Mechanics. Physics"*, vol. 9, no 2, pp. 22-29. DOI: 10.14529/mmph170203

8. Nigmatulin R. I. 1991. *Dynamics of Multiphase Media*. New York: Hem. Publ.
9. Khasanov M. K., Gimaltdinov I. K., Musakaev N. G. 2015. "Features of the Decomposition of Gas Hydrates with the Formation of Ice in a Porous Medium". *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 88, no 5, pp. 1052-1061. DOI: 10.1007/s10891-015-1284-5
10. Tsypkin G. G. 2007. "Analytical Solution of the Nonlinear Problem of Gas Hydrate Dissociation in a Formation". *Fluid Dynamics*, vol. 42, no 5, pp. 798-806. DOI: 10.1134/S0015462807050122
11. Tsypkin G. G. 2001. "Mathematical Model for Dissociation of Gas Hydrates Coexisting with Gas in Strata". *Doklady Physics*, vol. 46, no 11, pp. 806-809. DOI: 10.1134/1.1424377
12. Tsypkin G. G. 1992. "On Regimes of Gas Hydrate Dissociation in Highly Permeable Layers". *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 63, no 6, pp. 714-721. DOI: 10.1007/BF00853524
13. Tsypkin G. G. 2009. *Techeniya s fazovymi perekhodami v poristyykh sredakh* [Flows with Phase Transitions in Porous Media]. Moscow: Fizmatlit, 232 p.
14. Shagapov V. S., Khasanov M. K., Gimaltdinov I. K., Stolpovsky M. V. 2013. "The Features of Gas Hydrate Dissociation in Porous Media at Warm Gas Injection". *Thermophysics and Aeromechanics*, vol. 20, no 3, pp. 339-346. DOI: 10.1134/S0869864313030104
15. Shagapov V. Sh., Musakaev N. G. 2016. *Dinamika obrazovaniya i razlozheniya gidratov v sistemakh dobychi, transportirovki i khraneniya gaza* [Dynamics of Formation and Decomposition of Hydrates in the Systems of Gas Production, Transportation and Storage]. Moscow: Nauka, 238 p.
16. Chernov A. A., Pilnik A. A., Elistratov D. S., Mezentsev I. V., Meleshkin A. V., Bartashevich M. V., Vlasenko M. G. 2017. "New hydrate formation methods in a liquid-gas medium". *Scientific Reports*, vol. 7, no 40809. DOI: 10.1038/srep40809
17. Makogon Y. F. 2010. "Natural gas hydrates – A promising source of energy". *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 2, no 1, pp. 49-59. DOI: 10.1016/j.jngse.2009.12.004
18. Makogon Y. F., Holditch S. A., Makogon T. Y. 2007. "Natural Gas-Hydrates – a Potential Energy Source for the 21st Century". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 56, pp.14-31. DOI: 10.1016/j.petrol.2005.10.009