

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗЛОЖЕНИЯ ГАЗОГИДРАТА В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ, ВЫЗВАННОГО СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ НАГРЕВОМ

С. М. Сысоев [✉], М. М. Алексеев, Е. А. Петров
Сургутский государственный университет, Сургут, Россия
[✉] E-mail: smsysoev57@mail.ru

В работе представлены численные исследования двумерной осесимметричной модели разложения гидрата газа в пористых средах под действием сверхвысокочастотного электромагнитного нагрева. Система уравнений включает в себя уравнения баланса массы газовой, водной и гидратной фаз, уравнение энергетического баланса, обобщенный закон Дарси для воды и газа, уравнение кинетики Ким – Бишной для реакции разложения гидрата. Система замкнута условием равновесия смеси. Система уравнений сводится к четырем дифференциальным уравнениям относительно температуры, давления, гидрато- и водонасыщенности с соответствующими граничными и начальными условиями. Моделирование разложения гидрата газа в пористых средах под действием сверхвысокочастотного электромагнитного нагрева проводилось методом конечных элементов. При моделировании использованы физические параметры, характерные для типичного газогидратного пласта. Время нагрева резервуара составляло 10 суток. В результате исследования модели получены пространственные и временные распределения температуры, давления, гидрато-, водо- и газонасыщенности в пласте. Произведен расчет массы газа, выделившегося при диссоциации газогидрата. Выполнена оценка энергоэффективности электромагнитного нагрева. Результаты вполне применимы на практике, а метод электромагнитного нагрева технически достижим и конкурентоспособен.

Ключевые слова: математическая модель, пористая среда, сверхвысокочастотный электромагнитный нагрев, разложение газогидратов, добыча газа.

NUMERICAL SIMULATION OF THE DECOMPOSITION OF GAS HYDRATE IN A POROUS MEDIUM USING MICROWAVE HEATING

S. M. Sysoev [✉], M. M. Alekseev, E. A. Petrov
Surgut State University, Surgut, Russia
[✉] E-mail: smsysoev57@mail.ru

Numerical studies are performed with the two-dimensional axisymmetric model of gas hydrate decomposition in porous media under the action of microwave heating. The system of equations describing the above process includes the mass balance equations of gas, water and hydrate phases, the energy balance equation, generalized Darcy's law for water and gas, and the Kim – Bishnoi kinetics equation for hydrate decomposition reaction. The system of equations resolves itself into four differential equations relative to temperature, pressure, volume hydrate, water, and gas saturation with appropriate boundary and initial conditions. Simulation of gas hydrate decomposition in porous media under the action of microwave heating is carried out by finite element method. Physical parameters characteristic of a typical hydrate reservoir are used in the modeling. The reservoir was heated for ten days. Spatial and temporal distribution of temperature, pressure, hydrate, water, and gas saturation were obtained. The mass of gas evolved during hydrate dissociation was determined. The calculation of the energy efficiency of electromagnetic heating was carried out. These results are quite usable from a practical standpoint, and the electromagnetic heating method is technically achievable and competitive.

Keywords: mathematical model, porous medium, microwave heating, gas hydrates decomposition, gas production.

Введение

Месторождения газовых гидратов – одни из самых перспективных источников природного газа в будущем. Результаты многочисленных теоретических и экспериментальных исследований процессов гидратообразования и диссоциации в природных резервуарах представлены в работах [1–2]. Для добычи газа из залежей газовых гидратов были предложены несколько методов добычи: снижение давления, термическое стимулирование, закачка горячей жидкости, использование ингибиторов, закачка углекислого газа в пласт – или их комбинация [3–4]. Наиболее перспективным методом является термостимуляция пласта способом закачки горячих жидкостей, однако большие потери тепла в окружающие породы и их низкая проницаемость могут ограничивать его применение в отличие от термической обработки продуктивных пластов способом электромагнитного нагрева.

За счет глубокого проникновения и объемного тепловыделения, отсутствия теплоносителя электромагнитное излучение может обеспечить (по сравнению с традиционными методами) скорость, высокий уровень автоматизации технологических процессов и оптимальное управление, а также практически исключает вредное воздействие на окружающую среду. Результаты лабораторных и полевых испытаний продемонстрировали возможность разработки технологии нагрева нефтяного пласта электромагнитным излучением и ее эффективность [5–9], однако отсутствие достоверных данных по исследованию процессов теплопереноса в многофазных средах, характерных для нефтегазовых технологий, при воздействии на них сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного излучения препятствует ее реализации.

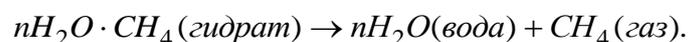
Теоретическое исследование теплопереноса в газогидратном пласте при его нагреве высокочастотным электромагнитным излучением проводилось на одно- и двумерных моделях. В исследованиях [10–12] изучались процессы фильтрации в пористых средах, заполненных твердым газогидратом или жидкостью, с депрессией и тепловыми эффектами (в том числе, электромагнитным нагревом), приводящими к фазовым переходам (разложение газогидрата, кипение жидкости), однако в целом проблема изучена недостаточно полно.

Постановка задачи

Рассматривается задача разложения газовых гидратов в пористой среде, первоначально насыщенной термодинамически равновесной смесью гидрата метана, воды и газа. Разложение гидрата газа в пористых средах происходит под действием сверхвысокочастотного электромагнитного нагрева. Численные исследования выполнены для двумерной осесимметричной модели в цилиндрической системе координат, в которой ось z совпадает с осью скважины. Горизонтальный пласт толщины H заключен между плоскостями, перпендикулярными оси z , – кровлей и подошвой, которые непроницаемы и теплоизолированы. Сверху и снизу пласт окружает неограниченная среда, теплофизические характеристики которой отличаются от характеристик пласта. Считается, что скелет пористой породы и газовый гидрат несжимаемы и неподвижны, газ является совершенным, вода несжимаема; движение газа и воды подчиняется закону двухфазной фильтрации Дарси, капиллярные эффекты не учитываются.

В скважину на уровне пласта помещен источник мощностью несколько киловатт, излучающий электромагнитные волны в радиальном направлении. Вследствие объемного поглощения электромагнитной энергии вокруг скважины происходит разогрев пласта и прилегающих пород, приводящий к разложению гидрата метана.

Разложение газового гидрата на газ и воду происходит в соответствии со следующей схемой:



При диссоциации гидрата метана на одну молекулу газа приходится 5,75 молекул воды ($n = 5,75$).

Основные уравнения, описывающие динамику равновесной смеси газа, воды и газового гидрата в пористой среде, представляют собой законы сохранения массы газа, массы воды, массы газогидрата и закон сохранения энергии [13].

Закон сохранения массы воды имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} (ms_w \rho_w) + \nabla \cdot \rho_w \vec{v}_w = q_w; \quad (1)$$

закон сохранения массы газа:

$$\frac{\partial}{\partial t} (m(1-s_w-s_h)\rho_g) + \nabla \cdot \rho_g \vec{v}_g = q_g; \quad (2)$$

закон сохранения массы газового гидрата:

$$\frac{\partial}{\partial t} (ms_h \rho_h) = -q_h, \quad (3)$$

при этом

$$s_h + s_w + s_g = 1, \quad (4)$$

где m – пористость, s – насыщенность, ρ – плотность, v – скорость фильтрации флюида, q – количество вещества, выделяемого в единицу времени из газогидрата, t – время, индексы h , w , g обозначают гидрат, воду и газ соответственно.

Скорости фильтрации воды и газа определяются законом Дарси:

$$\vec{v}_w = -\frac{Kk_{rw}}{\eta_w} \nabla (P - \rho_w gz); \quad (5)$$

$$\vec{v}_g = -\frac{Kk_{rg}}{\eta_g} \nabla (P - \rho_g gz), \quad (6)$$

где K – проницаемость пласта в присутствии газогидрата в порах, k_r – относительная фазовая проницаемость, η – динамическая вязкость флюида, P – давление, g – ускорение свободного падения, z – координата по вертикальной оси.

Для нахождения проницаемости пласта, зависящей от изменения гидратонасыщенности поровой структуры, используется следующее выражение:

$$K = K_0 (1 - s_h)^N, \quad (7)$$

где K_0 – естественная проницаемость, когда $s_h = 0$, N – параметр, зависящий от структуры пор.

Изменение количества газа, выделяемого при диссоциации газогидрата, определяется в соответствии с моделью, предложенной в работе [14]:

$$q_g = K_B M_g A_{HS} m s_h [P_{eq}(T) - P], \quad (8)$$

где K_B – константа скорости диссоциации, M – молярная масса, A_{HS} – константа, определяемая отношением площади поверхности сферических гидратных частиц к поровому объему, P_{eq} – равновесное давление, зависящее от температуры.

Константа скорости диссоциации определяется из выражения [14]:

$$K_B = k_d^0 e^{-\frac{\Delta E}{RT}}, \quad (9)$$

где k_d^0 – константа внутренней диссоциации, ΔE – энергия активации, R – газовая постоянная, T – температура.

Условие термодинамического равновесия смеси записывается в следующем виде [1]:

$$T = \alpha_1 \ln P_{eq} + \alpha_2, \quad (10)$$

где $\alpha_1 = 10,0$ К, $\alpha_2 = 128,1$ К.

Изменение количества воды и гидрата в единицу времени определяется из соотношений:

$$q_w = M_w n q_g / M_g, \quad (11)$$

$$q_h = M_h q_g / M_g. \quad (12)$$

Закон сохранения энергии записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} (\rho C)_e \frac{\partial T}{\partial t} - m Q \rho_h \frac{\partial s_h}{\partial t} - m(1 - s_h - s_w) \frac{\partial P}{\partial t} + \\ + (\rho_w \bar{v}_w C_w + \rho_g \bar{v}_g C_g) \nabla T + \bar{v}_w \nabla P = \nabla \cdot (\lambda_e \nabla T) + Q_H, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{где } (\rho C)_e = (1 - m) \rho_s C_s + m s_h \rho_h C_h + m s_w \rho_w C_w + m(1 - s_h - s_w) \rho_g C_g; \quad (14)$$

$$\lambda_e = (1 - m) \lambda_s + m s_h \lambda_h + m s_w \lambda_w + m(1 - s_h - s_w) \lambda_g, \quad (15)$$

где C – теплоемкость, Q – теплота диссоциации газогидрата, индекс e обозначает эффективное значение, s – скелет пористой среды.

Последнее слагаемое в выражении (13) Q_H – плотность объемного тепловыделения, возникающего вследствие поглощения электромагнитного излучения (закон Бугера – Ламберта с учетом геометрической расходимости излучения):

$$Q_H = \frac{\alpha W \Psi(z)}{2\pi r} \exp[\alpha(b - r)], \quad (16)$$

где α – показатель поглощения электромагнитного излучения в среде, W – линейная мощность излучателя (Ватт на единицу длины по оси z), функция $\Psi(z)$ характеризует распределение мощности электромагнитного излучения по высоте (диаграмма направленности излучателя), b – радиус скважины. В идеальном случае, когда электромагнитная волна «каналит» вдоль пласта, не проникая в прилегающие породы, функция $\Psi(z)$ имеет вид:

$$\Psi(z) = \begin{cases} 1 & \text{при } -H/2 \leq z \leq H/2, \\ 0 & \text{при } z < -H/2, \quad z > H/2. \end{cases} \quad (17)$$

Полный коэффициент поглощения излучения α в многофазной пористой среде определяется в виде

$$\alpha = (1 - m) \cdot \alpha_s + m \cdot s_h \cdot \alpha_h + m \cdot s_w \cdot \alpha_w + m \cdot s_g \cdot \alpha_g,$$

где α_s – показатель поглощения электромагнитного излучения в скелете пористой среды.

Так как $\alpha_w, \alpha_s, \alpha_h, \alpha_g$, значения полного коэффициента поглощения α определяются главным образом величиной коэффициента поглощения воды α_w и водонасыщенностью пласта s_w :

$$\alpha \approx m \cdot s_w \cdot \alpha_w(f, T).$$

Коэффициент поглощения воды α_w увеличивается с ростом частоты излучения и уменьшается с ростом температуры воды. Таким образом, полный коэффициент поглощения излучения α изменяется нелинейным образом как в пространстве пласта, так и с течением времени. Значения коэффициента поглощения воды α_w определялись по данным работы [15].

При вычислении фазовых проницаемостей использовались следующие зависимости [16]:

$$k_{rw}(s_w) = \begin{cases} [(s_w - 0,2)/0,8]^{3,5}, & 0,2 < s_w \leq 1 \\ 0, & 0 \leq s_w \leq 0,2 \end{cases}, \quad (18)$$

$$k_{rg}(s_w) = \begin{cases} (1 - s_w/0,9)^{3,5} (1 + 3s_w), & 0 < s_w \leq 0,9 \\ 0, & s_w \geq 0,9 \end{cases}. \quad (19)$$

Уравнение состояния газа записывается в виде

$$\rho_g(T, P) = \rho_{P_0, T_0} \frac{PT_0}{P_0T}, \quad (20)$$

где $\rho_{P_0, T_0} = 0,668 \text{ кг/м}^3$, $P_0 = 0,1013 \text{ МПа}$, $T_0 = 293,16 \text{ К}$.

Вязкость газа является функцией от давления и температуры, плотность и вязкость воды – функциями температуры.

Система уравнений (1)–(20) сводится к системе четырех уравнений относительно неизвестных T , P , s_h и s_w .

Начальные условия задаются следующим образом:

$$T(r, z, 0) = T_0, \quad P(r, z, 0) = P_0, \quad s_h(r, z, 0) = s_{h0}, \quad s_w(r, z, 0) = s_{w0}. \quad (21)$$

На верхней и нижней границах пласта записываются граничные условия для уравнений (1)–(2) в виде

$$\vec{v}_{w,g} = 0, \quad (22)$$

а для уравнения (13) следующим образом:

$$T = const. \quad (23)$$

Боковая граница открыта для потоков тепла и массы

$$T = const, \quad P = const. \quad (24)$$

На забое скважины задается давление

$$P(r, z, t)|_{r=b} = P_b. \quad (25)$$

Расчеты проводились при следующих значениях параметров [13]: $\rho_s = const = 2000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_h = const = 910 \text{ кг/м}^3$, $\lambda_w = 0,58 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\lambda_g = 0,0072 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\lambda_h = 2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\lambda_s = 1,9 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $C_w = 4200 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, $C_g = 2093 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, $C_h = 2700 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, $C_s = 920 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, $Q = 510 \text{ кДж/кг}$, $R = 8,3143 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$, $M_{CH_4} = 0,016043 \text{ кг/моль}$, $M_{H_2O} = 0,018 \text{ кг/моль}$, $M_h = 0,119543 \text{ кг/моль}$, $A_{HS} = 0,375 \text{ мм}^{-1}$, $\Delta E = 9,4 \text{ кДж/моль}$, $k_d^0 = 1,24 \cdot 10^3 \text{ моль/(м}^2 \cdot \text{МПа}\cdot\text{с)}$, $N = 2$, $n = 5,75$.

Рассматривался однородный и изотропный пласт со значениями пористости $m = 0,2$ и абсолютной проницаемости $K_0 = 3 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$. В качестве исходных данных модели заданы: начальная пластовая температура $T_0 = 293 \text{ К}$, начальное пластовое давление $P_0 = 14,6 \text{ МПа}$, репрессия на пласт $\Delta P = 4 \text{ МПа}$, начальная гидратонасыщенность $s_{h0} = 0,4$, начальная водонасыщенность $s_{w0} = 0,4$, начальная газонасыщенность $s_{g0} = 0,2$.

Результаты моделирования

Проведено численное исследование модели диссоциации газового гидрата в поровой среде пласта класса 3 под воздействием СВЧ-излучения методом конечных элементов. Расчеты выполнены для разрешенной для промышленного использования частоты СВЧ-излучения 2,45 ГГц. Исследование модели проведено для нагрева пласта СВЧ-излучением при условии, что давление в скважине было выше давления в пласте – режим репрессии. В этом случае происходит инжекция флюида в пласт.

Для сравнения результатов исследована диссоциация газового гидрата в поровой среде при депрессионном воздействии на пласт без нагрева (давление в скважине было ниже давления в пласте). При депрессионном воздействии на пласт флюиды движутся к скважине из-за наличия градиента давления. В локальных областях, где давление ниже равновесного давления, происходит диссоциация газового гидрата. Эта реакция эндотермическая, совершающаяся за счет теплового запаса пласта и окружающих пород. В результате в этих областях пласта температура понижается. В таких условиях скорости теплопереноса малы и диссоциация газового гидрата происходит медленно. Ускорить процесс диссоциации газового гидрата можно за счет подвода теплоты, выделившейся в результате поглощения электромагнитного излучения. Недостатком такого подхода является то, что в результате течения (фильтрации) воды и газа к скважине часть выделившегося тепла уносится этим потоком и не участвует в диссоциации газового гидрата.

При отсутствии градиента давления между скважиной и пластом все тепло, выделившееся в результате поглощения излучения, расходуется на нагрев пласта и диссоциацию газового гидрата. Однако в этом случае конвективный теплоперенос мал. Это приводит к перегреву области вблизи скважины, когда газовый гидрат там полностью диссоциировал (разложился). Энергетическая эффективность такого воздействия снижается.

При репрессиионном воздействии на пласт из-за созданного градиента давления между скважиной и пластом происходит течение воды и газа вдоль радиального направления от скважины. Наиболее интенсивное поглощение СВЧ-излучения водой происходит в око-

лоскважинной области. Течение нагретой воды вглубь пласта создает значительный конвективный теплоперенос, который способствует эффективной диссоциации газового гидрата.

Проведены исследования модели разложения газового гидрата для значения абсолютной проницаемости пласта $K_0 = 3 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$, начальной гидратонасыщенности $s_{h0} = 0,4$, начальной водонасыщенности $s_{w0} = 0,4$, начальной газонасыщенности $s_{g0} = 0,2$, при условиях воздействия на пласт СВЧ-излучения мощностью $W = 5 \text{ кВт}$ и частотой $f = 2,45 \text{ ГГц}$, разности давлений в скважине и пласте – репрессии на пласт $\Delta P = 4 \text{ МПа}$, времени нагрева – 10 суток (240 ч). При проведении численного исследования модели были получены пространственные и временные распределения температуры пласта, давления, гидратонасыщенности, водонасыщенности, газонасыщенности, а также зависимости масс диссоциировавшего газогидрата и выделившихся воды и газа от времени нагрева.

На рис. 1 приведены распределения температуры и давления в пласте от расстояния в радиальном направлении для трех времен нагрева.

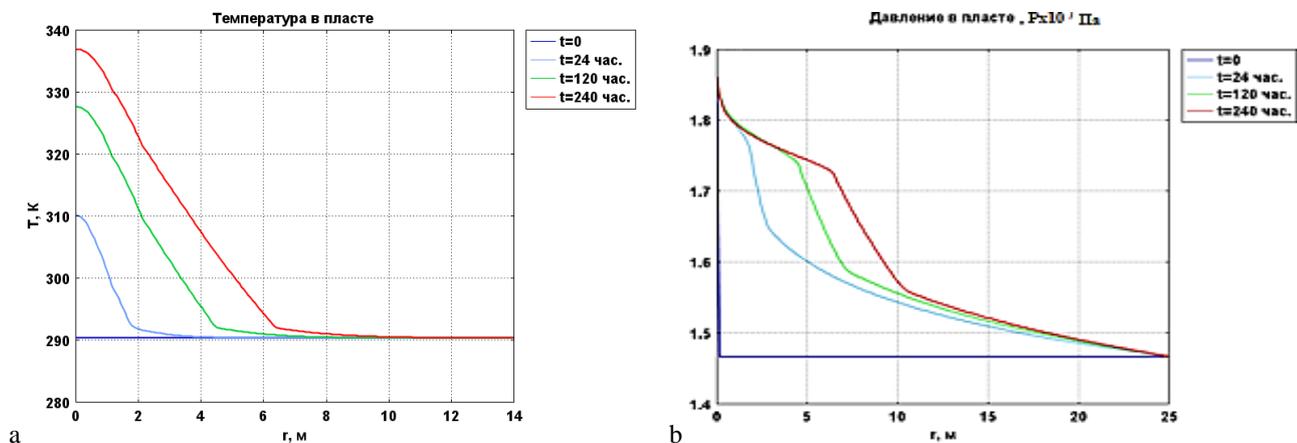


Рис. 1. Распределения температуры и давления в пласте от расстояния в радиальном направлении для трех времен нагрева:

a – зависимость температуры от радиального расстояния для разного времени нагрева при репрессии на пласт; *b* – зависимость давления в пласте от радиального расстояния для разного времени нагрева при репрессии на пласт (параметры источника СВЧ-излучения: частота излучения $f = 2,45 \text{ ГГц}$, мощность $W = 5 \text{ кВт}$)

Примечание: составлено авторами.

На рис. 1а виден характерный излом графика температуры, указывающий на границу, разделяющую пласт на две области: в одной – температура остается постоянной и равной начальной температуре пласта, в другой – наблюдается быстрый ее рост. Постоянство температуры в первой области объясняется тем, что все подведенное тепло тратится на диссоциацию имеющегося там газогидрата, а во второй области, расположенной ближе к источнику излучения, идет разогрев воды и газа в отсутствие газогидрата. Видно, что область повышенного давления и температуры в пласте с течением времени расширяется. В этой области давление в пласте меньше равновесного давления существования газового гидрата при локальной температуре. Следовательно, в этой области газовый гидрат диссоциировал на воду и газ.

На рис. 2а приведена гидратонасыщенность в пласте в радиальном направлении для трех времен нагрева: 24, 120 и 240 ч.

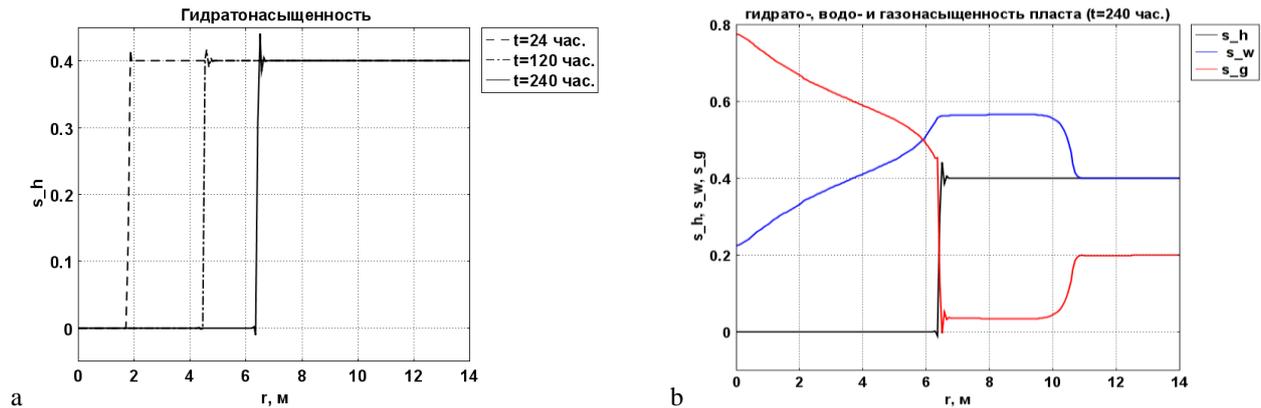


Рис. 2. Гидратонасыщенность в пласте:

a – зависимость гидратонасыщенности от радиального расстояния для разного времени нагрева при репресссионном воздействии на пласт; *b* – зависимость гидрато-, водо-, газонасыщенности в пласте от радиального расстояния для времени нагрева $t = 240$ ч при репресссионном воздействии на пласт (параметры источника СВЧ-излучения: частота излучения $f = 2,45$ ГГц, мощность $W = 5$ кВт)

Примечание: составлено авторами.

Видно, что при данных условиях СВЧ-нагрева пласта (частота излучения $f = 2,45$ ГГц, мощность $W = 5$ кВт) и фильтрации флюидов наблюдается узкая область разложения газогидрата (ее протяженность в радиальном направлении составляет 20 см).

На рис. 2b представлены результаты расчетов гидрато-, водо-, и газонасыщенности в пласте в зависимости от радиального расстояния от источника излучения для времени нагрева $t = 240$ ч. Видно, что в условиях репрессии в области пласта, где газогидрат полностью разложился, водонасыщенность растет до значения $s_w \approx 0,57$, далее в протяженной области (около 4 м в радиальном направлении при времени нагрева $t = 240$ ч) это значение остается постоянным, затем на расстоянии около 1 м в радиальном направлении происходит плавное уменьшение водонасыщенности до первоначального значения $s_w \approx 0,4$. В узкой зоне разложения газогидрата идет интенсивная передача тепла от нагретой воды к газогидрату. В протяженной области, где водонасыщенность остается постоянной, теплообмен приводит к нагреву газогидрата, но переданного тепла недостаточно для его разложения. Тем не менее этот процесс ускоряет диссоциацию газогидрата. Фильтрация газа в пласте не оказывает существенного влияния на процессы теплопередачи. Поведение функции газонасыщенности соответствует выполнению условия (4).

Для сравнения результатов была исследована диссоциация газового гидрата в поровой среде при депрессионном воздействии на пласт без нагрева (давление в скважине было ниже давления в пласте). Разность давлений в скважине и пласте – депрессия на пласт – составила также $\Delta P_{ден} = 4$ МПа, время воздействия – 10 суток (240 ч). На рис. 3a приведена зависимость гидратонасыщенности от радиального расстояния для времен депрессионного воздействия на пласт 120 и 240 ч. На рис. 3b представлены результаты расчетов гидрато-, водо-, и газонасыщенности в пласте в зависимости от радиального расстояния от скважины для времени воздействия $t = 240$ ч. Видно, что область разложения газогидрата имеет радиус около 0,6 м, что примерно в 10 раз меньше, чем в рассмотренном выше случае.

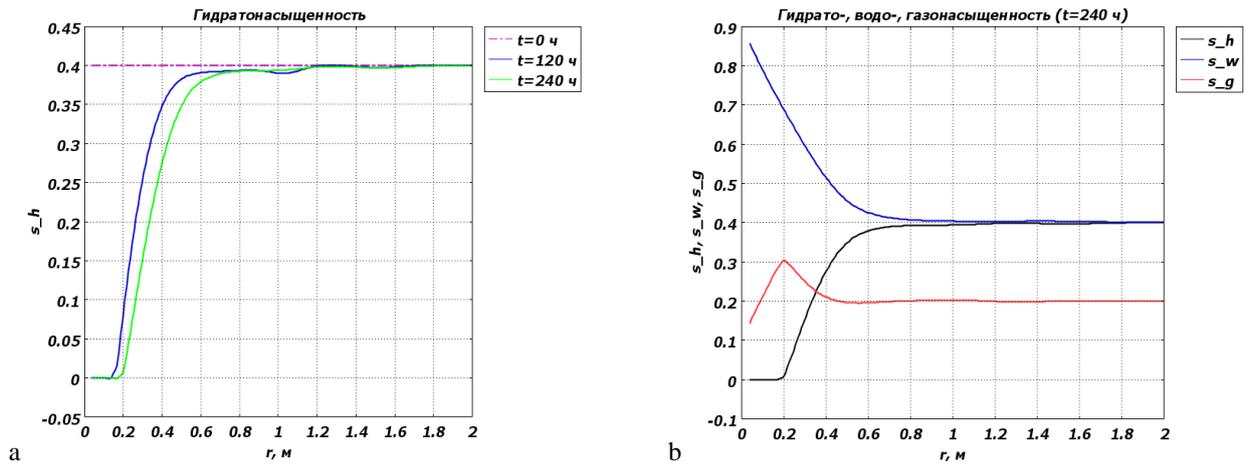


Рис. 3. Зависимость гидратонасыщенности от радиального расстояния:

a – зависимость гидратонасыщенности от радиального расстояния для разных времен депрессионного воздействия на пласт (без нагрева); *b* – зависимость гидрато-, водо-, газонасыщенности от радиального расстояния для времени депрессионного воздействия на пласт $t = 240$ ч (без нагрева)

Примечание: составлено авторами.

В работе были выполнены расчеты массы диссоциировавшего газового гидрата, скорости диссоциации газового гидрата и объема выделившегося при этом газа. Расчеты проводились с учетом того, что при разложении одного кубометра газогидрата метана выделяется 163 кубометра метана при нормальных условиях.

На рис. 4а приведена зависимость массы разложившегося газогидрата от времени нагрева СВЧ-излучением частотой $f = 2,45$ ГГц, мощностью $W = 5$ кВт при репрессиионном воздействии на пласт.

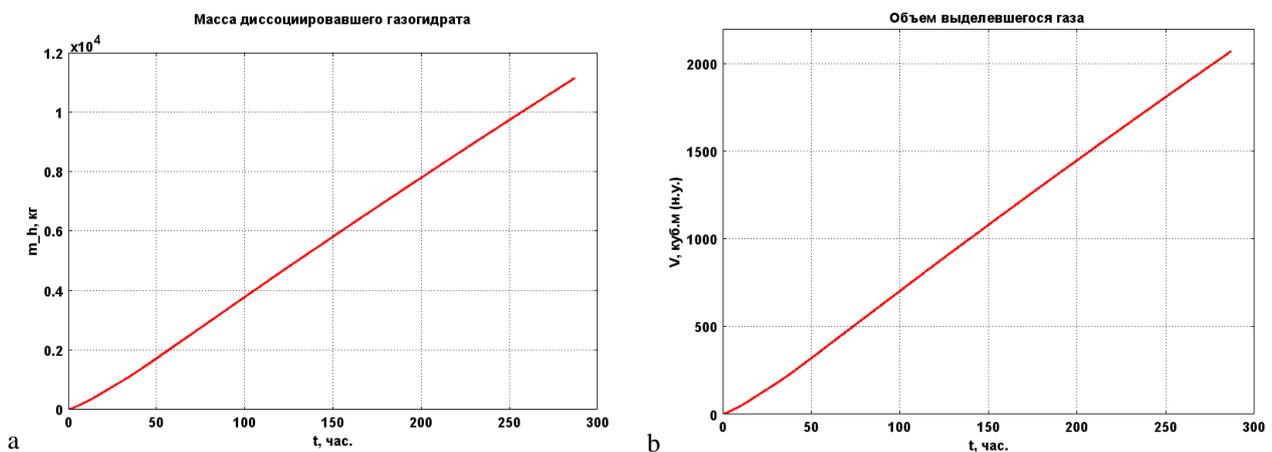


Рис. 4. Зависимость массы и объема разложившегося газогидрата от времени нагрева при репрессиионном воздействии на пласт:

a – зависимость массы разложившегося газогидрата от времени нагрева при репрессиионном воздействии на пласт; *b* – зависимость объема выделившегося газа в пласте от времени нагрева при репрессиионном воздействии на пласт (параметры источника СВЧ-излучения: частота излучения $f = 2,45$ ГГц, мощность $W = 5$ кВт)

Примечание: составлено авторами.

Масса разложившегося газогидрата за время нагрева $t = 240$ ч составила 9 346 кг, в то время как масса разложившегося газогидрата при использовании только депрессии (без нагрева) составила 45 кг.

На рис. 4б представлена зависимость объема выделившегося газа в пласте от времени нагрева при репрессиионном воздействии на пласт. Объем выделившегося газа за время нагрева $t = 240$ ч составляет 1 746 куб. м (н. у.).

Проведем расчет эффективности метода добычи газа из газогидрата с использованием электромагнитного разогрева для времени нагрева $t = 240$ ч ($f = 2,45$ ГГц, $W = 5$ кВт). Электромагнитная энергия, выделившаяся в пласте, равна

$$E_{ЭМ} = 5 \cdot 10^3 [Вт] \cdot 240 [час] \cdot 3600 [с] = 4,32 \cdot 10^9 \text{ Дж} .$$

Энергия, которая выделится при сжигании выделившегося при диссоциации газогидрата метана, равна

$$Q_{CH_4} = 1186,9 [кДж] \cdot 4 \cdot 10^7 [Дж/кг] = 4,75 \cdot 10^{10} \text{ Дж} ,$$

где $q = 4 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$ – теплота, выделяющаяся при сгорании 1 кг метана.

Энергетическую эффективность добычи газа из газогидрата с использованием электромагнитного нагрева пласта определяем по коэффициенту EROI (Energy return on invested), равному отношению получаемой энергии в результате сжигания добытого газа Q_{CH_4} и потребленной энергии из-за работы источника сверхвысокочастотного электромагнитного излучения $E_{ЭМ}$:

$$EROI = \frac{Q_{CH_4}}{E_{ЭМ}} = \frac{4,75 \cdot 10^{10}}{4,32 \cdot 10^9} \approx 11 .$$

Принято считать, что технология эффективна, если $EROI \geq 10$. Таким образом, метод можно считать приемлемым с точки зрения энергетической эффективности. Эти результаты вполне применимы с практической точки зрения, а метод электромагнитного нагрева технически достижим и конкурентоспособен, например, с методами разгерметизации или инъекции ингибитора. Показано, что высокочастотный электромагнитный нагрев может быть использован для стимулирования добычи газа из газогидратных залежей.

Заключение

В настоящей работе исследована близкая к реальным условиям математическая модель разложения гидрата газа в пористых средах под действием сверхвысокочастотного электромагнитного нагрева. Система уравнений включает в себя уравнения баланса массы газовой, водной и гидратной фаз, уравнение энергетического баланса, обобщенный закон Дарси для воды и газа, уравнение кинетики Ким – Бишной для реакции разложения гидрата. Система замкнута условием равновесия смеси. Система уравнений сводится к четырем дифференциальным уравнениям относительно температуры, давления, гидрато- и водонасыщенности с соответствующими граничными и начальными условиями.

Проведено численное исследование модели диссоциации газового гидрата в поровой среде пласта класса 3 под воздействием СВЧ-излучения методом конечных элементов. При моделировании использованы физические параметры, характерные для типичного газогидратного пласта. Расчеты были выполнены для разрешенной для промышленного использования частоте СВЧ-излучения $f = 2,45$ ГГц, мощность источника $W = 5$ кВт. Исследование модели было проведено для нагрева пласта СВЧ-излучением при условии, что давление в скважине было выше давления в пласте – режим репрессии. Время нагрева резервуара составляло 10 суток.

В результате исследования модели получены пространственные и временные распределения температуры, давления, гидрато-, водо- и газонасыщенности в пласте. Произведен расчет массы разложившегося газогидрата и массы газа, выделившегося при этом процессе.

Энергетическую эффективность добычи газа из газогидрата с использованием электромагнитного нагрева пласта определяли по коэффициенту EROI, равному отношению получаемой энергии в результате сжигания добытого газа и потребленной энергии из-за работы источника сверхвысокочастотного электромагнитного излучения. Коэффициент EROI оказался больше 10. Таким образом, метод можно считать приемлемым с точки зрения энергетической эффективности. Эти результаты вполне применимы с практической точки зрения, а метод электромагнитного нагрева технически достижим и конкурентоспособен, например, с методами разгерметизации или инъекции ингибитора. Показано, что высокочастотный электромагнитный нагрев может быть использован для стимулирования добычи газа из газогидратных залежей.

Настоящая работа выполнена в рамках проекта «Разработка, исследование и анализ физико-математических моделей для задач компьютерного инжиниринга высокотехнологичной продукции нефтегазовой отрасли» – победителя конкурсного отбора научных проектов в области фундаментальных и прикладных исследований, выполняемых научными коллективами образовательных организаций высшего образования, подведомственных Департаменту образования и молодежной политики Ханты-Мансийского автономного округа – Югры.

Литература

1. Макогон Ю. Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы // Рос. химич. журнал. 2003. Т. XLVТI, № 3. С. 70–79.
2. Chong Z. R., Yang S. H B., Babu P., Linga P., Li X.-S. Review of Natural Gas Hydrates as an Energy Resource: Prospects and Challenges // Applied Energy. 2016. Vol. 162. P. 1633–1652.
3. Fitzgerald G. C., Castaldi M. J. Thermal Stimulation Based Methane Production from Hydrate Bearing Quartz Sediment // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2013. Vol. 52. P. 6571–6581.
4. Yang J., Okwananke A., Tohidi B., Chuvilin E., Maerle K., Istomin V. et al. Flue Gas Injection into Gas Hydrate Reservoirs for Methane Recovery and Carbon Dioxide Sequestration // Energy Convers Manage. 2017. Vol. 136, P. 431–438.
5. Кислицын А. А. Тепломассоперенос в многофазных системах под воздействием высокочастотного электромагнитного излучения : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Тюмень, 1997. 46 с.
6. Саяхов Ф. Л., Ковалева Л. А., Насыров Н. М. Изучение особенностей тепломассообмена в призабойной зоне скважин при нагнетании растворителя с одновременным электромагнитным воздействием // Инженерно-физический журнал. 2002. Т. 75, № 1. С. 95–99.
7. Фатыхов М. А., Худабердина А. И. Комбинированные методы воздействия на нефтяные пласты на основе электромагнитных эффектов. Уфа : Изд-во БГПУ, 2010. 112 с.
8. Давлетбаев А. Я., Ковалева Л. А. Моделирование добычи высоковязкой нефти с использованием электромагнитного воздействия в сочетании с гидроразрывом пласта // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52, № 6. С. 927–933.
9. Сысоев С. М., Алексеев М. М. Численное моделирование нагрева нефтесодержащего пласта сверхвысокочастотным электромагнитным излучением // Вестник кибернетики. 2019. Т. 36, № 4. С. 6–16.
10. He S., Liang D., Li D., Ma L. Experimental Investigation on the Dissociation Behavior of Methane Gas Hydrate in an Unconsolidated Sediment by Microwave Stimulation // Energy Fuels. 2010. Vol. 25. P. 33–41.

11. Zhao J., Fan Z., Wang B., Dong H., Liu Y., Song Y. Simulation of Microwave Stimulation for the Production of Gas from Methane Hydrate Sediment // *Applied Energy*. 2016. Vol. 168. P. 25–37.
12. Wang B., Dong H., Fan Z., Liu Y., Lv X., Liu S., Zhao J. Numerical Analysis of Microwave Stimulation for Enhancing Energy Recovery from Depressurized Methane Hydrate Sediments // *Applied Energy*. 2020. Vol. 262. P. 1–14.
13. Басниев К. С., Нифантов А. В. Трехмерная математическая модель разложения гидратов метана в пористой среде под действием тепла // *Наука и техника в газовой промышленности*. 2004. № 1–2. С. 90–95.
14. Kim H. C., Bishnoi P. R., Heidemann R. A., Rizvi S. S. H. Kinetics of Methane Hydrate Decomposition // *Chemical Engineering Science*. 1987. Vol. 42, No. 7. P. 1645–1653.
15. Ellison W. J. Permittivity of Pure Water, at Standard Atmospheric Pressure, over the Frequency Range 0-25 THz and the Temperature Range 0-100 °C // *J Phys Chem Ref Data*. 2007. Vol. 36, No. 1. P. 1–18.
16. Бондарев Э. А., Попов В. В. Динамика образования гидратов при добыче природного газа // *Вычислительные технологии*. 2002. Т. 7, № 1. С. 28–33.