ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 119 за 2016 г.

ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Рагимли П.И., Повещенко Ю. А., Казакевич Г.И., Бойков Д.С., Гасилова И. В.

Модель флюидодинамики в пористой среде, содержащей газогидраты

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Модель флюидодинамики в пористой среде, содержащей газогидраты / П.И.Рагимли [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2016. № 119. 15 с. doi:10.20948/prepr-2016-119
URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-119

О р д е н а   Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Р о с с и й с к о й   а к а д е м и и   н а у к

П.И. Рагимли, Ю.А. Повещенко, Г.И. Казакевич,
Д.С. Бойков, И.В. Гасилова

Модель флюидодинамики в пористой среде, содержащей газогидраты

Москва — 2016

П.И. Рагимли, Ю.А. Повещенко, Г.И. Казакевич, Д.С. Бойков, И.В. Гасилова

Модель флюидодинамики в пористой среде, содержащей газогидраты

На основании разработанной двублочной математической модели диссоциации газовых гидратов в пористой среде построена и реализована на компьютере разностная схема, позволяющая дискретизировать задачу в одномерном случае. Проведены расчеты, показывающие, что с помощью программы возможно решать ряд типичных задач газогидратной флюидодинамики.

Ключевые слова: газовые гидраты, фильтрация, математическое моделирование

Parvin Ilgar kizi Rahimli, Yuri Andreevich Poveschenko, Grigory Ilych Kazakevich, Dmitry Sergeevich Boykov, Irina Vladimirovna Gasilova

Fluid dynamics model in porous media containing gas hydrates

On the basis of the developed mathematical model of two-component dissociation of gas hydrates in the porous medium there was built and implemented a computer-difference scheme, which allows to sample the task in the one-dimensional case. A number of calculations shows that the program is able to solve a set of common tasks of gas hydrate fluid dynamics.

Key words: gas hydrates, filtering, mathematical modeling

Оглавление

Введение

При транспортировке и переработке углеводородных газов наличие паров воды в них приводит к образованию конденсата водяных паров и ледяных пробок, что осложняет эксплуатацию газопроводов. Наличие влаги в газах при повышенном давлении и пониженных температурах вызывает образование и отложение в газопроводах гидратов углеводородных газов. Исследования показали, что подобные гидраты могут образовываться и под землей и аккумулировать большие количества газа. Поэтому в настоящее время к газовым гидратам, как к потенциальным источникам углеводородов [1], привлечено большое внимание. По имеющимся данным, объем углеводородного газа, содержащегося в гидратах, значительно превосходит остальные его запасы.

В основе математического описания движения жидкостей и газов в пористой среде лежат уравнения механики сплошной среды, выражающие законы сохранения массы, импульса и энергии [2]. Эти же законы могут быть использованы для исследования фильтрации с учетом диссоциации газовых гидратов. В настоящей работе используется математическая модель работы [3], в которой наиболее полно учтены основные физические особенности этого процесса. Согласно этой работе, система сводится к сатурационному блоку, отвечающему за конвективный перенос сатурационных параметров и обладающему, в основном, гиперболическими свойствами, и диссипативному уравнению. Такое расщепление позволяет применять явно-неявные разностные схемы при решении задач и избегать сильного измельчения временного шага.

В настоящей работе разработан численный метод решения одномерных задач в рамках этой модели.

Математическая модель

Задача описывается следующей системой уравнений:

сатурационный блок:

$$\frac{\partial}{\partial t}\{m(S_\nu S_w\rho_w + (1-S_\nu)\rho_\nu\beta_w)\} + div\left[\rho_w\overrightarrow{V_w}\right] + q_w = 0, \qquad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left\{m\big(S_\nu(1-S_w)\rho_g + (1-S_\nu)\rho_\nu(1-\beta_w)\big)\right\} + div\left[\rho_g\overrightarrow{V_g}\right] + q_g = 0, \qquad (2)$$

диссипативный блок:

$$D_p\frac{\partial P}{\partial t} + \delta_\varepsilon\, DIG + \frac{\psi}{m\rho_\nu}\, DIG_\varepsilon = 0, \qquad (3)$$

$$D_p = m\delta_\varepsilon \left\{ S_\nu \left[S_w \frac{(\rho_w)_p}{\rho_w} + (1 - S_w)\frac{(\rho_g)_p}{\rho_g} \right] + (1 - S_\nu)\frac{(\rho_\nu)_p}{\rho_\nu} + \frac{m_p}{m} \right\}$$
$$+ \frac{\psi}{m\rho_\nu}\left\{ m\left[S_\nu S_w \rho_w (\varepsilon_w)_p + S_\nu (1 - S_w)\rho_g (\varepsilon_g)_p \right.\right.$$
$$\left.\left. + (1 - S_\nu)(\varepsilon_\nu)_p \rho_\nu \right] + [(1 - m)\rho_s \varepsilon_s]_p \right\},$$
$$\delta_\varepsilon = \beta_w \varepsilon_w + (1 - \beta_w)\varepsilon_g - \varepsilon_\nu,$$
$$\frac{\psi}{m\rho_\nu} = \frac{\beta_w}{\rho_w} + \frac{1 - \beta_w}{\rho_g} - \frac{1}{\rho_\nu}, \tag{4}$$

$$DIG = \frac{1}{\rho_w}\, div\left[\rho_w \overrightarrow{V_w}\right] + \frac{1}{\rho_g} div\left[\rho_g \overrightarrow{V_g}\right] + \frac{q_w}{\rho_w} + \frac{q_g}{\rho_g},$$
$$DIG_\varepsilon = \rho_w \overrightarrow{V_w} \nabla\varepsilon_w + \rho_g \overrightarrow{V_g} \nabla\varepsilon_g + div\left[P\left(V_w + V_g\right)\right] + divW$$
$$+ \left(q_\varepsilon - \varepsilon_w q_w - \varepsilon_g q_g\right), \tag{5}$$
$$W = -\{m\left(S_\nu\left(S_w\lambda_w + (1 - S_w)\lambda_g\right) + (1 - S_\nu)\lambda_\nu\right) + (1 - m)\lambda_s\}\nabla T,$$

где индексы g,w,ν,s относятся к газу, воде, гидрату, скелету пористой среды; l – индекс, указывающий фазу; P – давление, T – температура, S_w – водонасыщенность, $S_g = 1 - S_w$ – газонасыщенность, ν – гидратонасыщенность, $S_\nu = 1 - \nu$ – растепленность, $\rho_l(P,T)$ – плотности фаз, V_l – скорость фильтрации соответствующей фазы; β_w – массовая доля воды в гидрате, $m(r,P)$ – пористость, r – радиус-вектор, t – время, $q_l(t,r,S_w,S_\nu,P)$ – плотности источников фаз, $\varepsilon_l(P,T)$ – внутренние энергии фаз, $\lambda_l(P,T)$ – коэффициенты теплопроводности.

Скорости фильтрации даются выражениями (закон Дарси с учетом гравитации в среде с общим давлением):

$$\overrightarrow{V_w} = -\frac{k \cdot k_{RW}}{\mu_W}\left(\nabla P - G\rho_W \vec{k}\right), \tag{6}$$

$$\overrightarrow{V_g} = -\frac{k \cdot k_{RG}}{\mu_G}(\nabla P - G\rho_G \vec{k}), \tag{7}$$

где k – вертикальный координатный орт, G – ускорение свободного падения,$k(r,S_\nu,P)$ – абсолютная проницаемость, $k_{RW}(S_w)$, $k_{RG}(S_w)$ – фазовые проницаемости, μ_W,μ_g – вязкости воды и газа.

Внутренняя энергия гидрата выражается через энергии создающих его газа и воды следующим образом:

$$\beta_w i_w + (1-\beta_w) i_g = i_v + h, \tag{8}$$

где h – скрытая теплота фазового перехода единицы массы гидрата, $i_l = \varepsilon_l + \frac{P}{\rho_l}$ – энтальпия.

Состояние гидрата описывается соотношением фазового равновесия

$$T = AlnP + B, \tag{9}$$

где A, B – эмпирические константы.

В силу этого соотношения в выражениях для всех параметров, где встречается зависимость от T, ее можно свести к зависимости от P.

Уравнения состояния для газа, воды и гидрата:

$$\rho_g = \frac{PM}{z(P,T)RT}, \rho_w = const, \rho_v = const, \tag{10}$$

где M – молярная масса газа, R – универсальная газовая постоянная, $z(P,T)$ – коэффициент сверхсжимаемости газа.

Получившаяся система состоит из функционального блока (1)-(2), отвечающего за характеристический перенос сатурационных возмущений (в математическом плане – это гиперболичность в независимых переменных S_v, S_w на фоне фиксированного давления P), и функционального блока (3), описывающего диссипативные и характеристически переносные процессы, выраженные нестационарностью по времени первого порядка $(\frac{\partial}{\partial t})$, над пространственными дифференциальными операциями второго порядка (в терминах вектора ∇). В последнем случае независимой переменной является давление P при фиксированных сатурациях S_v и S_w. Перенос сатураций – растепленности S_v и влагонасыщенности S_w – вдоль характеристик связан, соответственно, со сносом вниз и вверх по потоку.

Постановка задачи

Задача рассматривается в одномерной постановке. Также предполагается, что доля теплопроводности в общем балансе переноса тепла пренебрежимо мала по сравнению с конвекцией, т.е. в уравнении энергии кондуктивная составляющая полагается равной нулю ($divW = 0$). Ускорение свободного падения также не учитывается ($G = 0$). В итоге система (1-3) принимает следующий вид.

$$\frac{\partial}{\partial t}\{m(S_v S_w \rho_w + (1-S_v)\rho_v \beta_w)\} + \frac{\partial}{\partial x}\left[\rho_w \overrightarrow{V_w}\right] + q_w = 0, \tag{11}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\{m(S_\nu(1-S_w)\rho_g+(1-S_\nu)\rho_\nu(1-\beta_w))\}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\rho_g\overrightarrow{V_g}\right]+q_g=0, \quad (12)$$

$$D_p\frac{\partial P}{\partial t}+\delta_\varepsilon\left(\frac{1}{\rho_w}\frac{\partial}{\partial x}\left[\rho_w\overrightarrow{V_w}\right]+\frac{1}{\rho_g}\frac{\partial}{\partial x}\left[\rho_g\overrightarrow{V_g}\right]+\frac{q_w}{\rho_w}+\frac{q_g}{\rho_g}\right)+\frac{\psi}{m\rho_\nu}\left(\rho_w\overrightarrow{V_w}\frac{\partial\varepsilon_w}{\partial x}+\rho_g\overrightarrow{V_g}\frac{\partial\varepsilon_g}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left[P\left(\overrightarrow{V_w}+\overrightarrow{V_g}\right)\right]+\left(q_\varepsilon-\varepsilon_w q_w-\varepsilon_g q_g\right)\right)=0, \quad (13)$$

$$\overrightarrow{V_w}=-\frac{k\cdot k_{RW}}{\mu_W}\frac{\partial P}{\partial x},\overrightarrow{V_g}=-\frac{k\cdot k_{RG}}{\mu_G}\frac{\partial P}{\partial x}. \quad (14)$$

В начальный момент давление распределено по следующему закону

$$P(x,0)=10^7-99\times10^5*x, \quad (15)$$

а водонасыщенность и растепленность однородны по пространству:

$$S_w(x,0)=S_w^0, S_\nu(x,0)=S_\nu^0, \quad (16)$$

где $0<S_w^0<1$ и $0<S_\nu^0<1$ – постоянные величины, $x\in[0,l]$, l – длина расчетной области.

Границы задачи предполагаются «стенками», т.е. поток через них нулевой.

$$V_w|_{x=0}=0, V_g\big|_{x=0}=0, V_w|_{x=l}=0, V_g\big|_{x=l}=0,\ t>0. \quad (17)$$

В некоторой узкой области работает источник в виде

$$q_w=\alpha(P-P_N), q_g=\beta(P-P_N), q_\varepsilon=\varepsilon_w q_w+\varepsilon_g q_g, \quad (18)$$

где α и β – постоянные параметры, являющиеся некоторыми характеристиками источника (стока) в призабойной зоне, обусловленного перепадом давления внутри скважины и в пласте.

Описание метода

Исходные уравнения, граничные и начальные условия заменяются их сеточными аналогами, строится сетка с пространственным равномерным шагом

h и с шагом по времени τ_n, где n – номер шага по времени. При построении схемы для сатурационного блока используется противопоточная схема или схема «наветренных разностей» (в зарубежной литературе – UPWIND). Для простоты верхние индексы $n+1$ опущены.

Схема выглядит следующим образом:

$$D_p(P_i)\frac{P_i - P_i^n}{\tau} + \delta_\varepsilon(P_i)\cdot DIG_i + \frac{\psi}{m\rho_\nu}DIG_{\varepsilon i} = 0, \qquad (19)$$

$$i = \overline{1, N-1}\,, n > 0;$$

$$\begin{aligned} DIG_i = &-\left[\frac{k^n k^n_{rw})}{\mu_W}\right]_{i+\frac{1}{2}}\frac{P_{i+1} - P_i}{h^2} + \left[\frac{k^n k^n_{rw}}{\mu_W}\right]_{i-\frac{1}{2}}\frac{P_i - P_{i-1}}{h^2} \\ &-\left[\frac{\rho_g k^n k^n_{rg}}{\mu_G}\right]_{i+\frac{1}{2}}\frac{P_{i+1} - P_i}{\rho_{gi} h^2} + \left[\frac{\rho_g k^n k^n_{rg}}{\mu_G}\right]_{i-\frac{1}{2}}\frac{P_i - P_{i-1}}{\rho_{gi} h^2} \\ &+\frac{\alpha(P_i - P_N)}{\rho_w} + \frac{\beta(P_i - P_N)}{\rho_{gi}}; \end{aligned} \qquad (20)$$

$$\begin{aligned} DIG_{\varepsilon i} = \rho_w &\left[-\frac{k^n k^n_{RW}}{\mu_W P}\right]_i Ac_w\left(\frac{P_{i+1} - P_i}{h}\right)^2 \\ &+\left[-\frac{\rho_g k^n k^n_{RG}}{\mu_G P}\right]_i Ac_g\left(\frac{P_{i+1} - P_i}{h}\right)^2 \\ &-\left[\frac{P k^n k^n_{RW}}{\mu_W} + \frac{P k^n k^n_{RG}}{\mu_G}\right]_{i+\frac{1}{2}}\frac{P_{i+1} - P_i}{h^2} \\ &+\left[\frac{P k^n k^n_{RW}}{\mu_W} + \frac{P k^n k^n_{RG}}{\mu_G}\right]_{i-\frac{1}{2}}\frac{P_i - P_{i-1}}{h^2}\ ; \end{aligned} \qquad (21)$$

$$D_{pi} = m\delta_{\varepsilon i} S_{\nu i}(1 - S_{wi}) \frac{\left(\rho_{gi}\right)_p}{\rho_{gi}} + \frac{\psi}{m\rho_\nu}(1-m)\rho_s(\varepsilon_s)_p + \frac{\psi}{m\rho_\nu}\left\{m\left[S_{\nu i} S_{wi}\rho_w(\varepsilon_{wi})_p + S_{\nu i}(1 - S_{wi})\rho_{gi}\left(\varepsilon_{gi}\right)_p + (1 - S_{\nu i})\rho_\nu(\varepsilon_{\nu i})_p\right]\right\}, \tag{22}$$

$$\delta_{\varepsilon i} = \beta_w \varepsilon_{wi} + (1 - \beta_w)\varepsilon_{gi} - \varepsilon_{\nu i}, \frac{\psi}{m\rho_\nu} = \frac{\beta_w}{\rho_w} + \frac{1 - \beta_w}{\rho_{gi}} - \frac{1}{\rho_\nu}\ ;$$

$$m\rho_w \frac{S_{\nu_i} S_{w_i} - S_{\nu_i}^n S_{w_i}^n}{\tau} + m\rho_\nu \beta_w \frac{1 - S_{\nu_i} - (1 - S_{\nu_i}^n)}{\tau} + \frac{\rho_w}{h}\left(\frac{max\left\{\left(-\frac{P_{i+1}^n - P_i^n}{h}\right), 0\right\}}{\mu_W} k\left(S_{\nu_{i+1}}^n\right) k_{RW}\left({S_w}_i^n\right) + \frac{min\left\{\left(-\frac{P_{i+1}^n - P_i^n}{h}\right), 0\right\}}{\mu_W} k\left(S_{\nu_i}^n\right) k_{RW}\left(S_{w_{i+1}}^n\right) - \frac{max\left\{\left(-\frac{P_i^n - P_{i-1}^n}{h}\right), 0\right\}}{\mu_W} k\left(S_{\nu_i}^n\right) k_{RW}\left({S_w}_{i-1}^n\right) - \frac{min\left\{\left(-\frac{P_i^n - P_{i-1}^n}{h}\right), 0\right\}}{\mu_W} k\left(S_{\nu_{i-1}}^n\right) k_{RW}({S_w}_i^n)\right) + \alpha\left(P_i - P_N\right) = 0, i = \overline{1, N-1}, n > 0; \tag{23}$$

$$m\frac{S_{\nu_i}(1-S_{w_i})\rho_{g_i}-S_{\nu_i}^n(1-S_{w_i}^n)\rho_{g_i}^n}{\tau}+m\rho_\nu(1-\beta_w)\frac{1-S_{\nu_i}-(1-S_{\nu_i}^n)}{\tau}$$
$$+\frac{1}{h}\left(\rho_{g_{i+\frac{1}{2}}}^n\frac{max\left\{\left(-\frac{P_{i+1}^n-P_i^n}{h}\right),0\right\}}{\mu_G}k\left(S_{\nu_{i+1}}^n\right)k_{RG}\left(S_{w_i}^{\;n}\right)\right.$$
$$+\rho_{g_{i+\frac{1}{2}}}^n\frac{min\left\{\left(-\frac{P_{i+1}^n-P_i^n}{h}\right),0\right\}}{\mu_G}k\left(S_{\nu_i}^n\right)k_{RG}\left(S_{w_{i+1}}^n\right) \qquad (24)$$
$$-\rho_{g_{i-\frac{1}{2}}}^n\frac{max\left\{\left(-\frac{P_i^n-P_{i-1}^n}{h}\right),0\right\}}{\mu_G}k\left(S_{\nu_i}^n\right)k_{RG}\left(S_{w_{i-1}}^{\;n}\right)$$
$$\left.-\rho_{g_{i-\frac{1}{2}}}^n\frac{min\left\{\left(-\frac{P_i^n-P_{i-1}^n}{h}\right),0\right\}}{\mu_G}k\left(S_{\nu_{i-1}}^n\right)k_{RG}(S_{w_i}^n)\right)$$
$$+\beta\left(P_i-P_N\right)=0, i=\overline{1,N-1}, n>0;$$

$$P(x,0)=P_i^0, i=\overline{1,N-1};$$
$$S_w(x,0)=S_{w_i}^0, S_\nu(x,0)=S_{\nu_i}^0, i=\overline{0,N}; \qquad (25)$$

$$V_{w0}^n=0, V_{g0}^n=0, V_{wN}^n=0, V_{gN}^n=0, n>0 (P_0=P_1, P_N=P_{N-1}). \qquad (26)$$

c_w, c_g – теплоемкости воды и газа при постоянном объеме.

Метод решения: Первым решается диссипативный блок (19)-(22) с фиксированными значениями растепленности и водонасыщенности. Соответствующее разностное уравнение представляет собой систему нелинейных алгебраических уравнений, которая после применения метода хорд в индексной форме сводится к трехточечному уравнению:

$$A_i\delta P_{i-1}-C_i\delta P_i+B_i\delta P_{i+1}=-F_i, i=1,N, \qquad (27)$$

где s – номер итерации, $\delta P_i=P_i^{s+1}-P_i^s$ – приращение давления на s+1 итерации. Уравнение (27) на каждом временном слое решается с помощью метода простых итераций в сочетании с алгоритмом прогонки. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность по давлению:

$$|\delta P_i| < \varepsilon_1 |P_i^s| + \varepsilon_2, \tag{28}$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – малые величины.

Далее, располагая значениями давления P, можно совершить переход ко второму этапу. Вычисляется сатурационный блок, а именно, считаются S_w и S_v по явной схеме. Из дискретных соотношений (23)-(24) после сложения находятся значения растепленности, которые затем подставляются в уравнение (23), откуда определяются водонасыщенности. Процедура повторяется до заданного времени расчета.

Для коррекции нефизических осцилляций используется метод адаптивной искусственной вязкости. В интервалах немонотонности решения коэффициенты проницаемостей заменяются на:

$$\begin{gathered} k\left(S_v + sign(-gradP)\mu\frac{\partial S_v}{\partial x}\right), \\ k_{rw}\left(S_w - sign(-gradP)\mu\frac{\partial S_w}{\partial x}\right), \\ k_{rg}\left(S_w - sign(-gradP)\mu\frac{\partial S_w}{\partial x}\right), \end{gathered} \tag{29}$$

где $0 < \mu < 1$ – коэффициент искусственной вязкости.

Результаты расчетов

Для расчета были выбраны следующие значения параметров:
$\rho_w = 10^3\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \rho_v = 910\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \beta_w = 0.9, m = 0.35, A = 7.28, B = 169.7K,$
$\mu_w = 10^{-3}\text{Па}\cdot\text{сек}, \mu_g = 0.014\cdot 10^{-3}\text{Па}\cdot\text{сек}, h = 3\cdot 10^6\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}, c_w = 4165\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}},$
$c_g = 2500\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}, c_v = \beta_w c_w + (1-\beta_w)c_g, c_s = 873\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}, M = 0.016\frac{\text{кг}}{\text{моль}},$
$R = 8.31\frac{\text{Дж}}{\text{моль}\cdot\text{К}}, S_w^0 = 0.6, S_v^0 = 0.5, k(S_v) = k_0(S_v)^3, k_0 = 10\text{мД} = 10^{-14}\text{м}^2,$
$\rho_s = 2800\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, k_{rw}(S_w) = 1.477S_w^5 - 1.587S_w^6 + 1.11S_w^7 - 0.0473,$
$k_{rg}(S_w) = 1.044 - 1.7S_w + 0.6S_w^2, z(P,T) = 1.$
Минимальное значение водонасыщенности $S_{wmin} = 0.55$.
$k_{rw}(S_w) = 0,\ k_{rg}(S_w) = k_{rg}(S_{wmin})$ при $S_w \le S_{wmin}$.
Максимальное значение водонасыщенности $S_{wmax} = 0.9$.
$k_{rw}(S_w) = k_{rw}(S_{wmax}),\ k_{rg}(S_w) = 0$ при $S_w \ge S_{wmax}$.

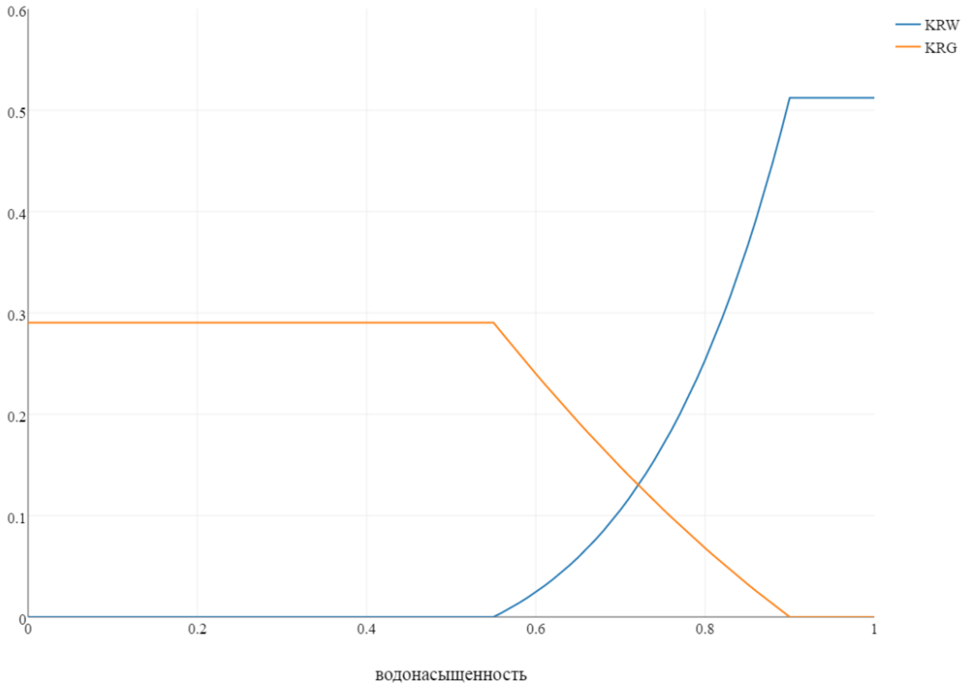

Рис. 1.Зависимости фазовых проницаемостей воды и газа от водонасыщенности.

Длина модельной трубы полагается равной *l=1м,* шаг по пространственной координате *h=0.01м.* Расчеты проводятся для моментов времени $t = 1; 10; 100$ сек. На рисунках 1, 2, 3, 4 показаны результаты расчетов для водонасыщенности, растепленности, давления и температуры соответственно.

На рисунках 5,6,7,8 показаны результаты расчетов водонасыщенности, растепленности, давления и температуры, когда работает источник газа при $x \in [0.4; 0.6]$.$\alpha = 0, \beta = 0.0001$.

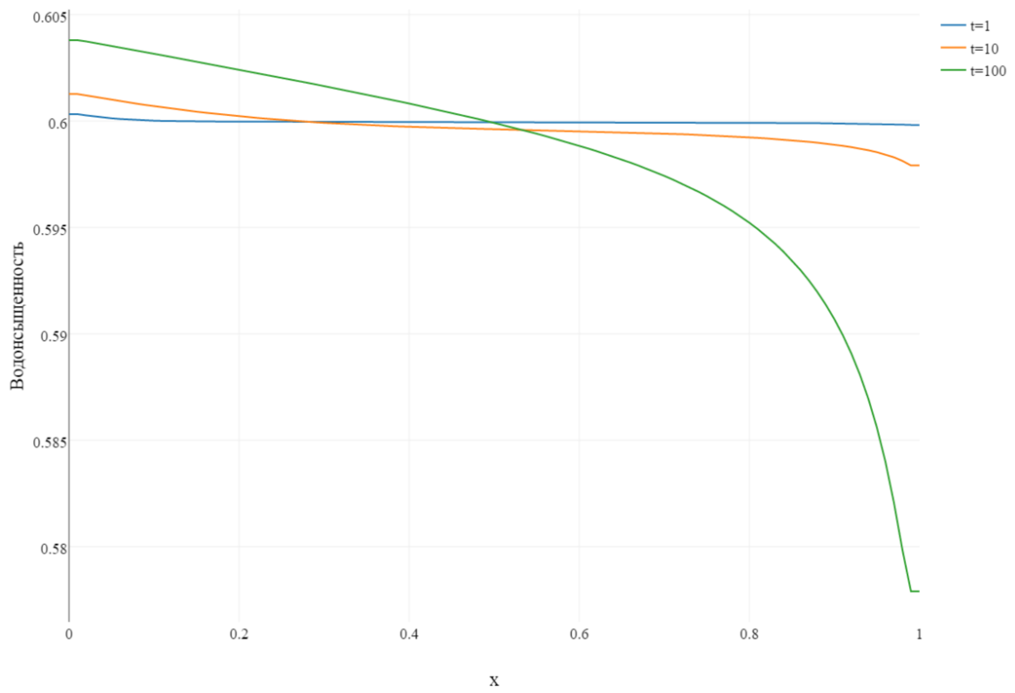

Рис. 2. Распределение водонасыщенности для моментов времени 1,10,100 с., $\alpha = 0, \beta = 0$.

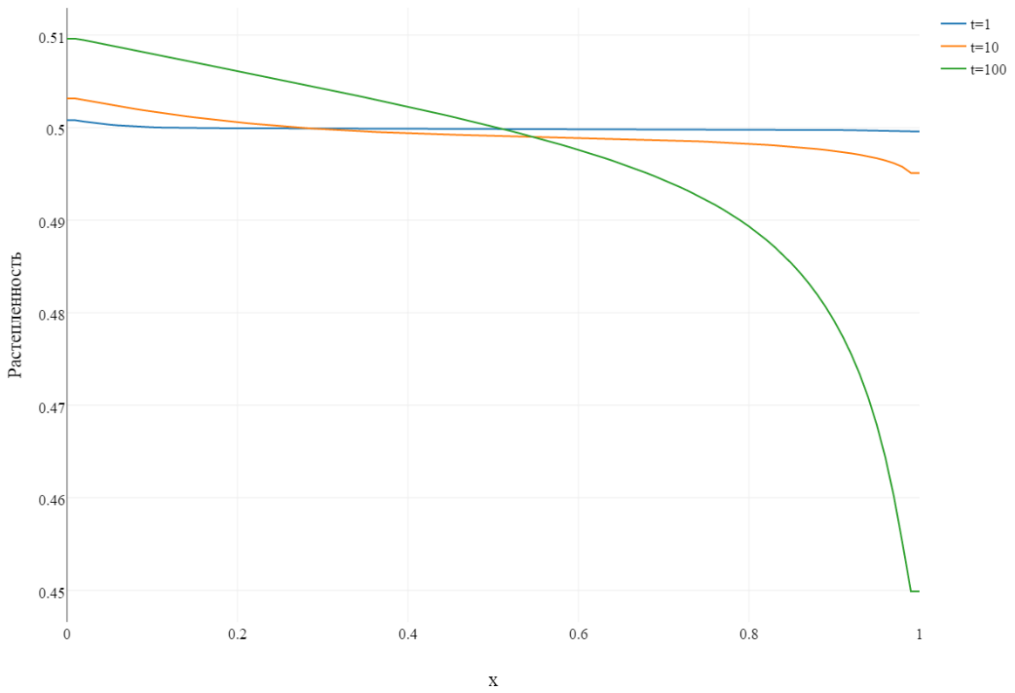

Рис. 3. Распределение растепленности для моментов времени 1,10,100 с., $\alpha = 0, \beta = 0$.

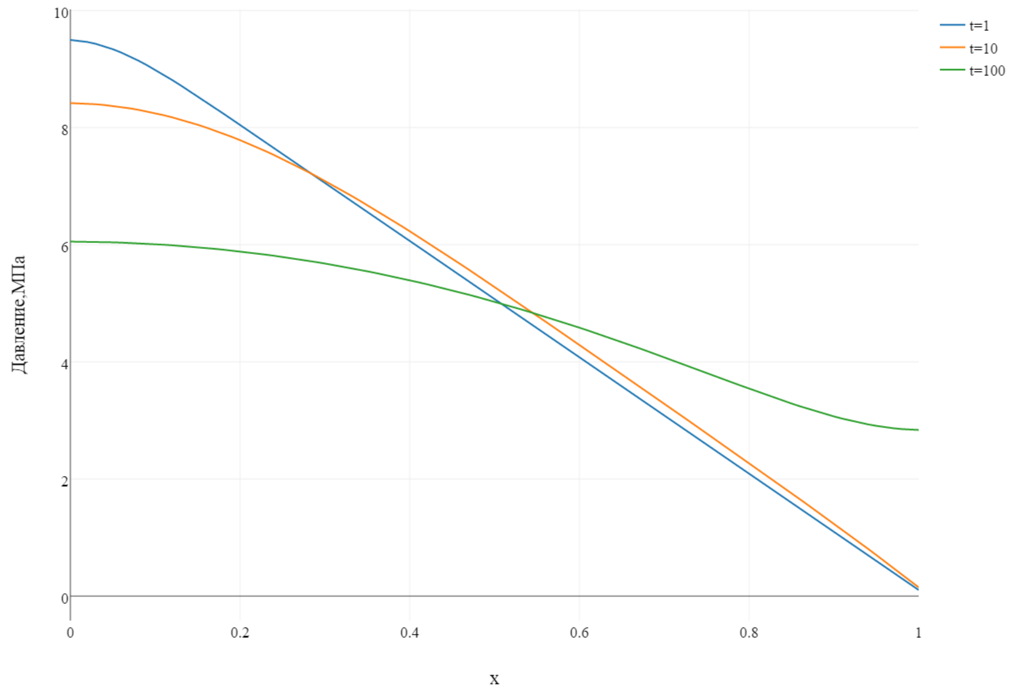

Рис. 4. Распределение давления для моментов времени 1,10, 100с., $\alpha = 0, \beta = 0$.

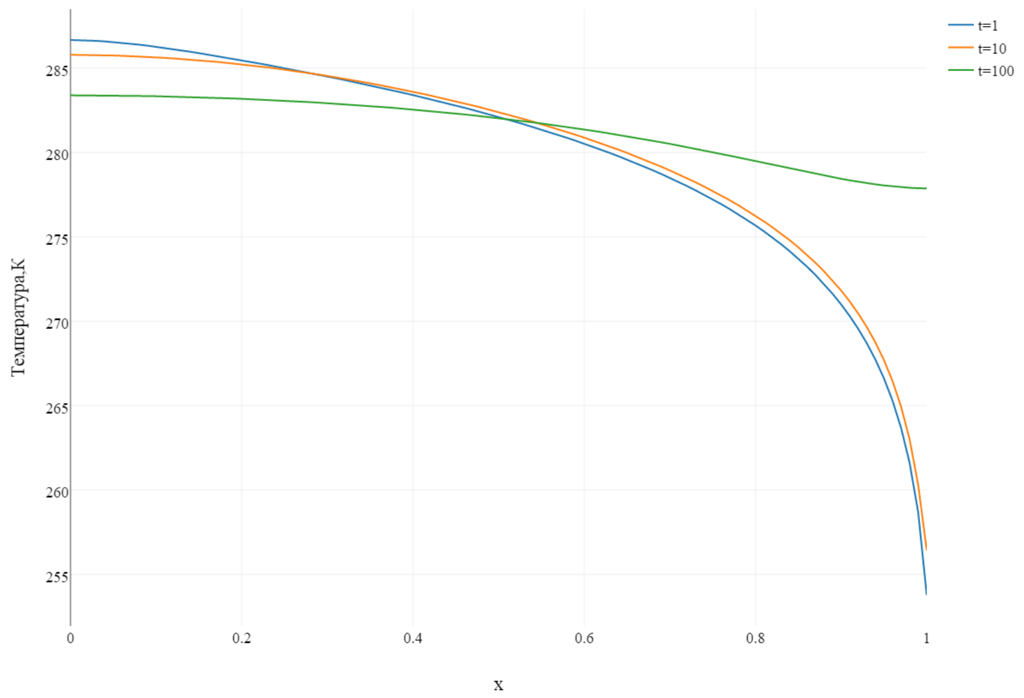

Рис. 5. Распределение температуры для моментов времени 1,10, 100 с., $\alpha = 0, \beta = 0$.

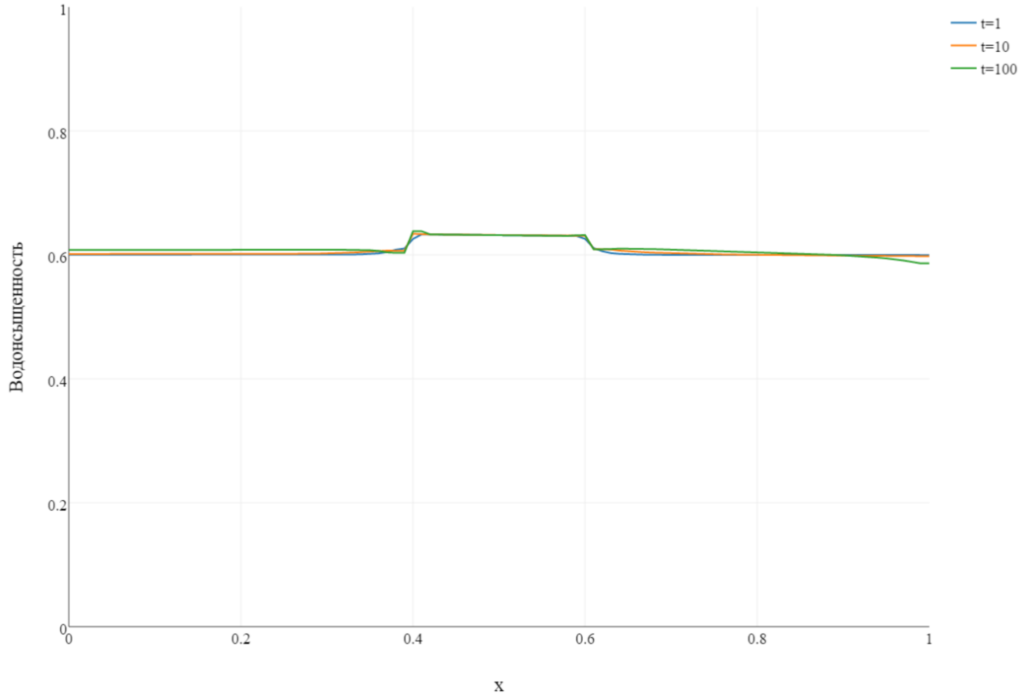

Рис. 6. Распределение водонасыщенности для моментов времени 1,10,100 сек, $\alpha = 0, \beta = 0.0001$ при $x \in [0.4; 0.6]$.

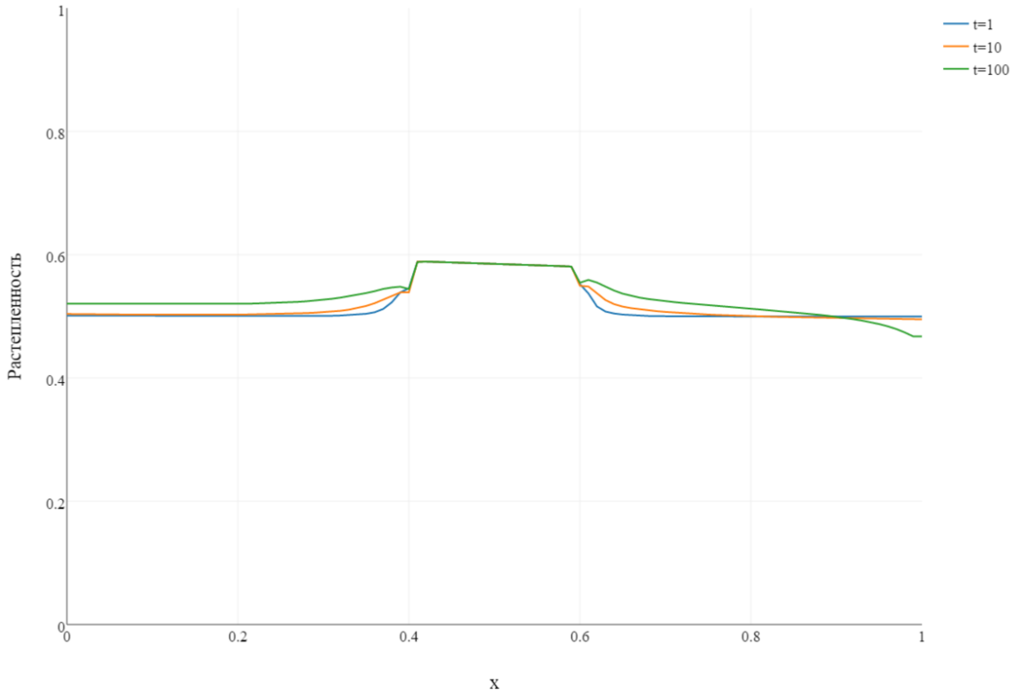

Рис. 7. Распределение растепленности для моментов времени 1,10,100 сек, $\alpha = 0, \beta = 0.0001$ при $x \in [0.4; 0.6]$.

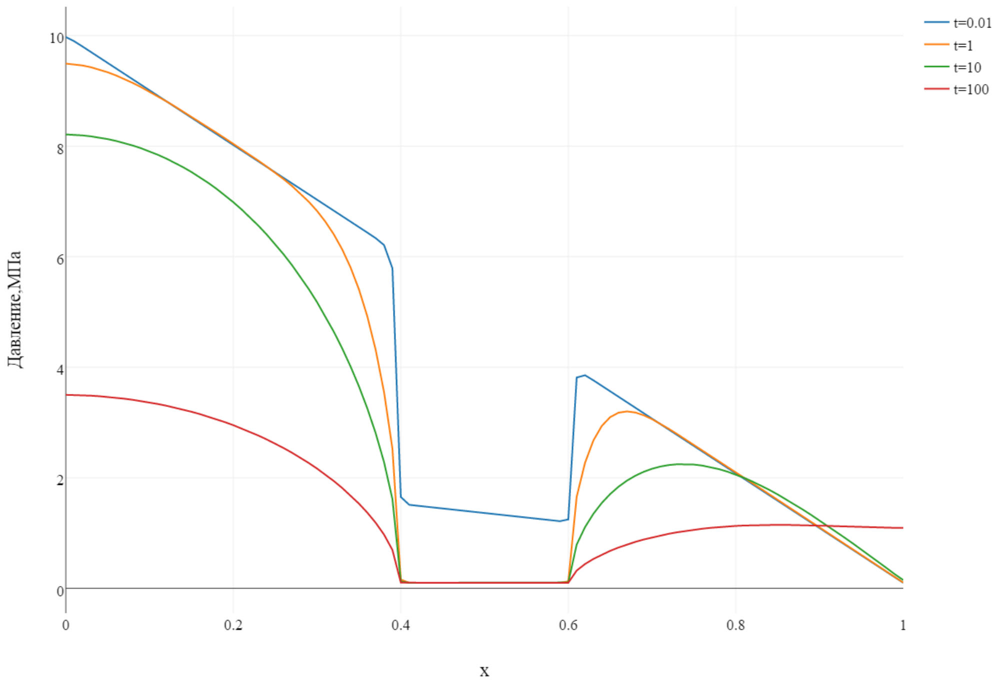

Рис. 8. Распределение давления для моментов времени 1,10,100 сек, $\alpha = 0, \beta = 0.0001$ при $x \in [0.4; 0.6]$.

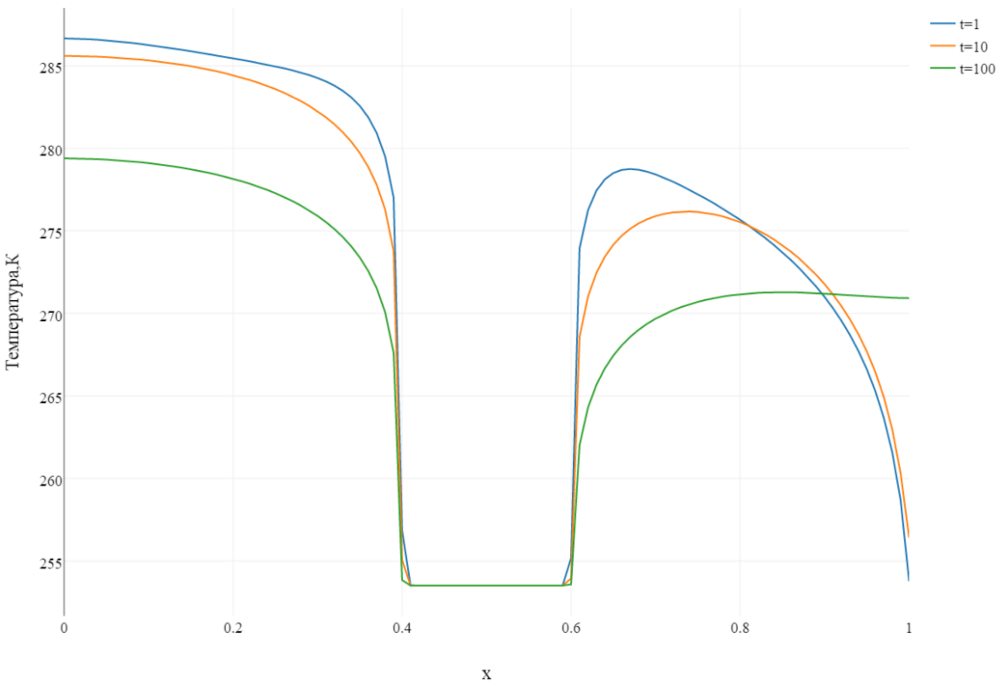

Рис. 9. Распределение температуры для моментов времени 1,10,100 сек, $\alpha = 0, \beta = 0.0001$ при $x \in [0.4; 0.6]$.

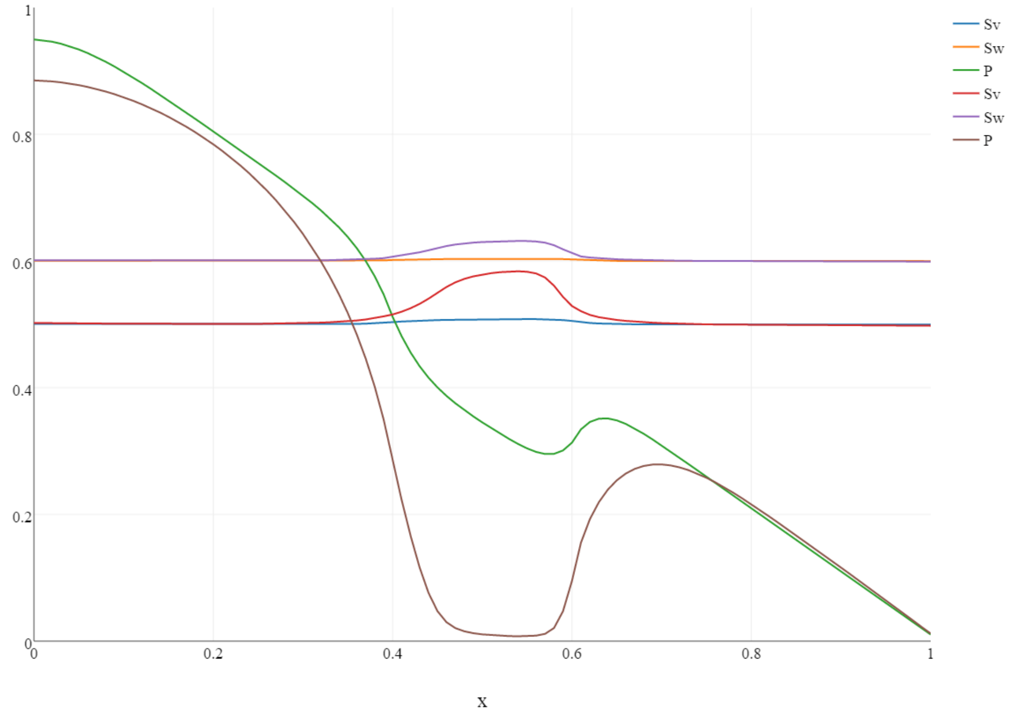

Рис. 10. Распределения растепленности, водонасыщенности и давления для моментов времени 1;5 сек, $q_w = 0, q_g = 1$Па при $x \in [0.4; 0.6]$.

Заключение

В работе построена разностная схема, позволяющая численно решать систему уравнений фильтрации жидкостей и газов в пористой среде с учетом диссоциации газовых гидратов, неявная по давлению и явная по водонасыщенности и растепленности. На основании этой схемы создана компьютерная программа. Результаты расчетов показывают пригодность разработанных методов для расчета реальных задач, связанных с залежами газогидратов.

Теоретическая часть данной работы выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 16-11-00100 (разделы: введение, математическая модель, постановка задачи).

Расчеты и анализ результатов модельных задач проведены при поддержке грантов РФФИ № 16-29-15081 офи_м , № 16-31-00350 мол_а (разделы: описание метода, результаты расчетов).

Список литературы

1. Englezos P. Clathrate hydrates // Ind. Eng. Chem. Res., 1993. V.32. P. 1251-1274
2. Басниев К.С. Подземная гидромеханика: учебник для вузов / Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М. – М.: Недра, 1993. – 416 с.
3. Повещенко О.Ю., Гасилова И.В., Галигузова И.И., Дорофеева Е.Ю., Ольховская О.Г., Казакевич Г.И. Об одной модели флюидодинамики в пористой среде, содержащей газогидраты // Математическое моделирование, Т. 25, № 10, с. 32-42, 2013.